



---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Shaqir Pillana**

**Untersuchung und Berechnung  
der aerodynamischen  
Eigenschaften eines Rennwagens  
der Formula Student Klasse**

2013

---

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Untersuchung und Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften eines Rennwagens der Formula Student Klasse**

Autor:

**Shaqir Pillana**

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB10wk-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Frank Weidemann

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt

Mittweida, Septemeber 2013



---

## **Bibliografische Angaben**

Pllana, Shaqir: Untersuchung und Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften eines Rennwagens der Formula Student Klasse, 128 Seiten, 62 Abbildungen, 9 Tabellen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Maschinenbau

Bachelorarbeit, 2013

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

## **Referat**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des aerodynamischen Verhaltens eines Formula Student Rennwagens bei den Geschwindigkeiten 30km/h, 60 km/h und 90 km/h. Dafür werden drei Modelle entwickelt: zunächst wird ein Referenzmodell erstellt, das ohne jegliche aerodynamischen Komponenten simuliert wird. Ein zweites Modell wird mit einem Diffusor ausgestattet. Anschließend wird noch ein drittes Modell erstellt, welches eine Vollausstattung, bestehend aus einem Diffusor, einem Frontflügel und einem Heckflügel, bekommt. Mit dem Simulationstool *Flow Simulation* von SolidWorks werden diese Modelle dann strömungstechnisch untersucht. Ein Modell wurde im Windkanal im Voraus getestet, um Vergleichswerte für die Simulationsergebnisse zu bekommen. Zum Schluss werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und ein Ergebnis über den Nutzen der aerodynamischen Komponenten in der Formula Student Klasse präsentiert.

# I. Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Vorwort</b>	<b>IV</b>
<b>1 Übersicht</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	1
1.3 Problembeschreibung . . . . .	2
<b>2 FORMULA STUDENT</b>	<b>3</b>
2.1 Was ist Formula Student? . . . . .	3
2.2 Anforderungen durch das Formula Student Reglement . . . . .	3
2.3 Anforderungsliste . . . . .	7
<b>3 Strömungstechnische Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1 Ähnlichkeitstheorie . . . . .	9
3.1.1 Reynolds-Zahl . . . . .	11
3.1.2 Froude-Zahl . . . . .	11
3.1.3 Mach-Zahl . . . . .	12
3.2 Strömungswiderstand . . . . .	12
3.3 Abtrieb . . . . .	13
3.4 Probleme bei Modelluntersuchungen . . . . .	14
<b>4 Stand der Technik</b>	<b>17</b>
4.1 Wirkungsweise von aerodynamischen Komponenten . . . . .	18
4.2 Herstellung der aerodynamischen Komponenten . . . . .	21
4.3 Numerische Strömungsmechanik . . . . .	22
<b>5 Konstruktion eines Modells des Formelrennwagens im Maßstab 1:15</b>	<b>23</b>
5.1 Bodeneffekt . . . . .	23
5.2 Unterboden und Diffusor . . . . .	26
5.3 Flügel . . . . .	30
5.3.1 Frontflügel . . . . .	38
5.3.2 Heckflügel . . . . .	39
<b>6 Herstellung des 3D-Modells</b>	<b>42</b>
6.1 Catalyst . . . . .	42
6.2 Funktionsprinzip des verwendeten 3D-Druckers . . . . .	43
6.3 Schwierigkeiten . . . . .	45

---

<b>7 Konstruktion und Anpassung der Messvorrichtung zur Messung des Abtriebs am Unterboden</b>	<b>47</b>
7.1 Windkanal . . . . .	47
7.2 Funktionsweise des Messsystems . . . . .	50
7.3 Funktion der Messvorrichtung . . . . .	50
<b>8 Strömungssimulation</b>	<b>52</b>
8.1 Anleitung zur Simulation . . . . .	52
8.2 Ergebnisse . . . . .	63
8.3 Mögliche Optimierungsmaßnahmen . . . . .	67
8.4 Vergleich von Versuch und Rechnung . . . . .	67
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>69</b>
<b>A Bildmaterial vom 3D-Drucken</b>	<b>70</b>
<b>B Bildmaterial zu den Simulationen</b>	<b>75</b>
<b>C Simulationsergebnisse</b>	<b>81</b>
<b>D Zeichnungen der Vorrichtung</b>	<b>118</b>
<b>E Daten-CD</b>	<b>125</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>126</b>

## II. Abbildungsverzeichnis

2.1	Fahrzeug - Konfigurierung . . . . .	5
3.1	Geometrische und strömungstechnische Ähnlichkeit von zwei umströmten Profilen .	10
3.2	Die Entstehung des Abtriebs . . . . .	13
3.3	Widerstandsbeiwert $c_w$ von Kugel, Kreiszylinder und Kreisscheibe in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl $Re$ . . . . .	16
4.1	Schema eines Fahrzeugs mit flachem Unterboden . . . . .	18
4.2	Luftwiderstand und Auftrieb von Fahrzeugteilen . . . . .	19
4.3	Wirkung von Endplatten . . . . .	21
4.4	Schema eines zweiteiligen Flügels . . . . .	21
5.1	Referenzmodel mit dem Maßstab 1:15 . . . . .	23
5.2	Prinzip des Bodeneffekts . . . . .	24
5.3	Abhängigkeit des Abtriebs vom Bodenabstand . . . . .	25
5.4	Bodeneffekt an einem Flügelprofil . . . . .	26
5.5	Errechneter Verlauf der Abtriebskraft über der Fahrgeschwindigkeit . . . . .	27
5.6	Unterboden und Diffusor sind eine Einheit . . . . .	28
5.7	Drücke und Geschwindigkeiten am Diffusor . . . . .	29
5.8	Wichtige Größen eines Diffusors . . . . .	30
5.9	Begriffe und Größen eines Flügels . . . . .	31
5.10	Profilarten . . . . .	31
5.11	Vergleich symmetrischer und gewölbter Profile . . . . .	32
5.12	Auftrieb in Abhängigkeit vom Anstellwinkel . . . . .	33
5.13	Druckverteilung an Profilen mit Wölbungsclappen . . . . .	34
5.14	Abtriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Wöl- bungsclappen . . . . .	35
5.15	Schematische Darstellung eines Heckflügels der Formula 1 mit mehreren Flügeln . .	35
5.16	Entstehende Momente durch die Lage der Flügel . . . . .	37
5.17	Frontflügel- und Profilbemaßung . . . . .	39
5.18	Heckflügel- und Profilbemaßung . . . . .	40

---

5.19 Fahrzeug mit der Vollausrüstung . . . . .	41
6.1 Modellierung durch Catalyst . . . . .	43
6.2 3D-Drucker der Hochschule Mittweida . . . . .	44
6.3 Trennen des Stützmaterials vom Modellmaterial . . . . .	45
6.4 Funktionsprinzip des 3D-Druckers . . . . .	45
7.1 Testauto im Windkanal der Uni Bayreuth . . . . .	48
7.2 Messwerte des Testautos im Windkanal der Uni Bayreuth . . . . .	49
7.3 Vorrichtung . . . . .	50
7.4 Messvorrichtung - Übersicht . . . . .	51
8.1 Maske - Geometrie prüfen . . . . .	54
8.2 Assistent-Maske 1 - <i>Projektname</i> . . . . .	54
8.3 Assistent-Maske 2 - <i>Einheitensystem</i> . . . . .	55
8.4 Assistent-Maske 3 - <i>Analyseart</i> . . . . .	56
8.5 Assistent-Maske 4 - <i>Standardfluid</i> . . . . .	56
8.6 Assistent-Maske 5 - <i>Wandbedingungen</i> . . . . .	57
8.7 Assistent-Maske 6 - <i>Anfangs und Umgebungsbedingungen</i> . . . . .	57
8.8 Assistent-Maske 7- <i>Ergebnisse und Geometrieauflösung</i> . . . . .	58
8.9 Flow Simulation Baumstruktur . . . . .	59
8.10 Einstellung des Berechnungsraums . . . . .	59
8.11 Randbedingung einfügen . . . . .	60
8.12 Definition eines Gleichungsziels . . . . .	61
8.13 Manuelle Veränderung des Anfangsnetzes . . . . .	61
8.14 Berechnungsoptionen . . . . .	62
8.15 Maske - Ausführen . . . . .	62
A.1 3D-Drucker . . . . .	71
A.2 Komponenten nach dem Drucken . . . . .	72
A.3 Fahrzeuge nach dem die Einzelteile zusammengefügt wurden. . . . .	73
A.4 Die drei Konfigurationen . . . . .	74
B.1 Car-Orange . . . . .	76
B.2 Car-Orange . . . . .	76
B.3 Car-Referenz . . . . .	77

---

B.4	Car-Vollausstattung . . . . .	78
B.5	Car-Vollausstattung . . . . .	78
B.6	Car-Vollausstattung . . . . .	79
B.7	Car-Vollausstattung . . . . .	79
B.8	Flügelprofil . . . . .	80

---

## III. Tabellenverzeichnis

2.2 Anforderungsliste . . . . .	8
4.1 Beiträge von Fahrzeugkomponenten zu Luftwiderstand und Abtrieb . . . . .	19
8.1 Vergleich: CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG bei 30km/h. . . . .	63
8.2 Vergleich: CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG bei 90km/h. . . . .	64
8.3 Ergebnisse-Übersicht . . . . .	65
8.4 Vergleich: Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG-ORIGINALGRÖSSE . . . . .	66
8.5 Vergleich: CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG bei 60km/h. . . . .	66
8.6 Vergleich: Windkanal und Simulation CAR-ORANGE . . . . .	68

## IV. Vorwort

Diese Bachelorarbeit stellt den Abschluss meines Bachelorstudiums und damit den Schritt in einen neuen Lebensabschnitt dar. Ich möchte diese Stelle nutzen, um mich bei den Menschen zu bedanken, die mich während der Arbeit tatkräftig unterstützt haben.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Lutz Voigt und Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Beutekamp möchte ich mich für die zur Verfügung gestellten Rechner bedanken. Ohne die Rechner wären in dem kurzen Zeitraum nicht so viele Berechnungen möglich gewesen.

Auch Herrn B. Eng. Sascha Saralajew, der mich mit dem Schreibprogramm Lyx vertraut gemacht hat und bei Fragen immer ein offenes Ohr hatte, möchte ich herzlich danken.

Ronny Wagler möchte ich für seine Unterstützung danken.

Meinen betreuenden Professoren, Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Weidermann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhard, danke ich für die Freiheiten, das Vertrauen und die Unterstützung während meiner Arbeit und meines gesamten Studiums. Besonders hervorzuheben ist Herrn Prof. Dr.-Ing. Weidermanns Rolle bei den Untersuchungen im Windkanal. Durch seine Hilfsbereitschaft und seine Kontakte zur Universität Bayreuth hat er die Untersuchungen im Windkanal erst möglich gemacht.

Auch dem gesamten Team von TMM gebührt Dank, denn ohne die fachliche Weiterentwicklung, welche ich während meiner zweijährigen Tätigkeit im Team erfahren durfte, wäre der Grundstein für diese Arbeit wohl nicht gelegt worden. Stets wurde auch mit gutem Rat und Unterstützung zur Seite gestanden.

Für das Korrekturlesen möchte ich mich bei Lisa Sommer, Marcus Schulze und Herrn B. Eng. Robin Becker bedanken, da sie mir damit einen großen Freundschaftsdienst erwiesen haben.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie und engen Freunden danken, die mir stets den Rücken stärken.



# 1 Übersicht

In diesem einleitenden Kapitel soll zunächst die Bedeutung des Themas Aerodynamik für das Team des Technikum Mittweida Motorsport (TMM) kurz beschrieben werden, um anschließend die Aufgabenstellung "Untersuchung und Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften eines Rennwagens der Formula Student Klasse" näher zu beleuchten.

## 1.1 Motivation

In den vergangenen Jahren hat die aerodynamische Betrachtung in vielen Rennserien an Bedeutung gewonnen. In den meisten Rennserien ist es heute sogar das bestimmende Entwicklungskriterium [Trz12, S.127]. Man hat erkannt, dass sich die aerodynamischen Modifikationen an Rennwagen in kürzeren Rundenzeiten widerspiegeln, wenngleich die aerodynamischen Anbauten zusätzliches Gewicht bedeuten. Einige Mitglieder des Teams TMM<sup>1</sup> haben die Auffassung, dass sich der Aufwand in dieser Rennklasse nicht lohne, da die Durchschnittsgeschwindigkeiten, die bei ca. 60km/h liegen, zu gering seien, um einen bemerkbaren Abtrieb zu erzeugen. Aus diesem Grund ist es wichtig, Klarheit zu schaffen, inwieweit aerodynamische Betrachtungen an einem Fahrzeug der Formula Student Klasse sich lohnen. Dabei sollen Antworten auf die folgenden Fragen gefunden werden:

- Lohnt sich der Aufwand bei diesen, für Formula Wettbewerben eher geringen Geschwindigkeiten?
- Welche bekannten abtriebserzeugenden Mittel bewirken einen spürbaren Abtrieb bzw. den größten Abtrieb im Rahmen des Formula Student Reglements?
- Inwieweit verursachen zusätzliche aerodynamische Anbauten wie Frontflügel, Heckflügel und Diffusor einen Luftwiderstand oder sogar einen nicht gewollten Auftrieb?

## 1.2 Zielsetzung

In der Vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob und inwieweit sich aerodynamische Anbauten in der Rennklasse der Formula Student lohnen. Dabei soll zunächst auf Strömungsergebnisse eines Fahrzeugs, welches zuvor im Windkanal schon untersucht worden ist, zurückgegriffen werden. Darauf aufbauend soll eine Strömungssimulation erstellt werden, die Ergebnisse liefern soll, die den Ergebnissen aus dem Windkanal ähneln. Diese Strömungssimulation soll dann als Grundlage für alle weiteren Simulationen

---

<sup>1</sup> TMM steht für Technikum Mittweida Motorsport

dienen. Es soll dann zunächst das diesjährige (2013) Fahrzeug als Miniaturmodell durch Rapid Prototyping (3D-Drucken) realisiert werden, welches als Referenz genommen werden soll. Um eine fundierte Aussage zu machen, sollen mehrere Konfigurationen des Referenzmodells, die mit aerodynamischen Komponenten ausgestattet sein sollen, erstellt werden. Diese Modelle sollen dann simuliert und im Windkanal getestet werden. Dabei soll zunächst lediglich die Wirkung vom Diffusor, sowie Diffusor in Kombination mit Heckflügel und Frontflügel getestet werden.

Bei diesen Untersuchungen soll der Augenmerk besonders auf den Abtrieb und den Luftwiderstand geworfen werden. Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse soll dann eine Aussage getroffen werden, inwieweit sich die Anbauten in der Rennklasse der Formula Student lohnen. Damit soll die Entscheidung des Teams erleichtert werden, ob und inwieweit aerodynamische Komponenten in dem Rennwagen der kommenden Saison (2014) berücksichtigt werden sollten. Außerdem soll eine Berechnungsgrundlage entstehen, die es möglich machen soll, Optimierungen der Modelle vorzunehmen, ohne ständig den Windkanal zu besuchen um die Ergebnisse zu bestätigen.

### **1.3 Problembeschreibung**

Eine Herausforderung ist bei dieser Untersuchung einerseits das erstellen von geeigneten Miniaturmodellen, die so gestaltet sein sollten, dass sie vom vorhandenen 3D-Drucker gedruckt werden können. Andererseits muss noch eine Vorrichtung konstruiert und gefertigt werden, die es möglich macht die gewünschten Abtriebskräfte und den Bodeneffekt mit dem vorhandenen Messsystem der Uni Bayreuth zu erfassen. Es stellt sich noch die Frage, inwieweit die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Windkanal durch die Simulationssoftware reproduzierbar sind. Anschließend könnte es eine Herausforderung sein, eine Hochskalierung der Ergebnisse auf das Großmodell vorzunehmen.

## 2 FORMULA STUDENT

### 2.1 Was ist Formula Student?

Die Formula Student ist ein internationaler Konstruktionswettbewerb, bei dem Studenten ein einsitziges Rennfahrzeug bauen und sich mit Teams aus der ganzen Welt messen. Die Teams arbeiten mit der Aufgabe, einen Prototypen zu entwickeln und herzustellen, der für die Produktion geeignet wäre. Dabei soll die Zielgruppe der nicht professionellen Wochenendrennfahrer sein, der auch darauf Wert legt, dass das Rennfahrzeug gute Fahreigenschaften besitzt, günstig, zuverlässig und komfortabel ist und eine gewisse Ästhetik mit sich bringt. Bei diesem Wettbewerb können Studenten ihr in den Vorlesungen erworbenes theoretisches Wissen in die Praxis umsetzen und festigen. Dabei werden intensive Erfahrungen mit Konstruktion und Fertigung sowie mit den wirtschaftlichen Aspekten des Maschinenbaus gemacht. Ein wichtiger Punkt ist, dass nicht das schnellste Team den Wettbewerb gewinnt, sondern das Team, welches das beste Gesamtpaket aus Konstruktion, Performance, sowie Finanz- und Verkaufsplanung liefert. Bewertungen werden von Juroren aus Experten der Motorsport-, Automobil- und Zulieferindustrie vorgenommen [FSG13]. Die Juroren bewerten die Teams in sieben Disziplinen: den statischen Disziplinen, welche Konstruktion (Engineering Design Event), Kostenplanung (Cost and Manufacturing Event) und Verkaufspräsentation (Business Presentation Event) beinhalten und die dynamischen Disziplinen, welche eine Querschleunigungsfahrt (Skid Pad), eine Beschleunigung (Acceleration), ein Handling Kurs (Autocross), ein Ausdauerrennen (Endurance) und den Kraftstoffverbrauch (Fuel efficiency) beinhalten [FSGd13].

### 2.2 Anforderungen durch das Formula Student Reglement

Für einen reibungslosen und sicheren Ablauf des Wettbewerbs sorgt das FSAE-Reglement. Dieses ist ein umfassend ausgeführtes Regelwerk, dass für jedes an Formula Student Wettbewerben teilnehmende Team sowohl den organisatorischen Ablauf der Veranstaltungen, als auch die technischen Voraussetzungen der Rennfahrzeuge regelt. Dadurch, dass hauptsächlich sicherheitsrelevante Aspekte beachtet werden müssen, wird eine individuelle, kreative Gestaltung der einzelnen Fahrzeuge gewährleistet. Bei Nichteinhaltung der Anforderungen droht die Disqualifikation aus dem Wettbewerb, wenn das Fahrzeug innerhalb einer vorgegebenen Zeit nicht regelkonform abgeändert wird. Daher muss ein großer Augenmerk auf das FSAE-Reglement gelegt werden. Die folgende Regeln müssen beachtet werden:

### T.1.2 Änderungen und Reparaturen

Sobald das Fahrzeug in den dynamischen Disziplinen zugelassen ist, sind die einzigen Änderungen am Fahrzeug gestattet, welche unten aufgeführt sind:

- i Einstellung des Flügelwinkels ist erlaubt, aber nicht die Lage des Flügels [SAE13, S. 23].

### T.2.1 Fahrzeug-Konfigurierung

- 1) Aus Perspektive von 68.6mm (2.7 Zoll) oberhalb der Ebene, die von den Spitzen der Vorder- und Hinterreifen gebildet wird, müssen die oberen 180 Grad der Räder / Reifen frei sein. Siehe hierzu in der Abbildung 2.1 den blauen Strich über den Rädern.
- 2) Von der Seite aus Betrachtet müssen die Räder / Reifen frei sein.
- 3) Kein Teil des Fahrzeugs darf sich in der Keep-Out-Zone befinden. Diese ist durch einen Kreis, welcher 68.6mm (2.7 Zoll) größer ist als der Außendurchmesser des Reifens, definiert. Dabei muss der Reifen geradeaus gelenkt mit einem 77kg (170 Pfund) schweren Fahrer, der in normaler Fahrposition sitzt, sein. Die innere Seitenwand des Reifens (fahrzeugseitig) ist nicht Bestandteil dieser Analyse. Siehe Abbildung 2.1.

Hinweis: Die trockenen Reifen werden für alle Prüfungen verwendet. Für die technische Inspektion der Keep-Out-Zone wird ein Tennisball, welcher am Ende eines Stockes befestigt ist, verwendet. Der Ball hat den Durchmesser von 68.6mm (2,7 Zoll) und muss in der Lage sein, sich frei um die Außenseite des Reifens zu bewegen ohne Kontakt mit einem Teil des Fahrzeugs, mit Ausnahme des Reifens, zu haben [SAE13, S.24].

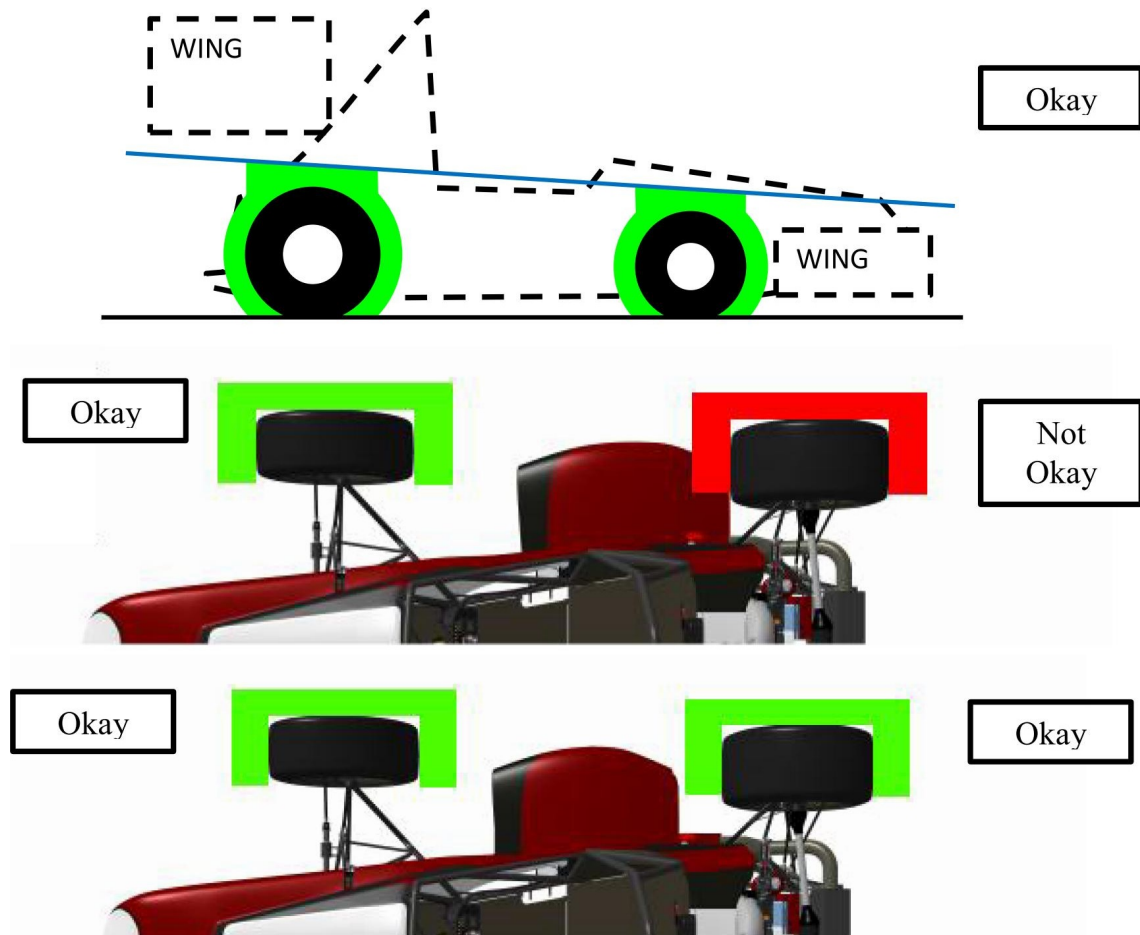


Abbildung 2.1: Fahrzeug - Konfigurierung

Quelle: [SAE13, S.24]

### T.3.24 Karosserie an der Front

**T.3.24.1** Scharfe Kanten an der nach vorn gerichteten Karosserie oder an anderen hervorstehenden Bauteilen sind verboten.

**T.3.24.2** Alle nach vorne gerichteten Kanten an der Karosserie, die Menschen beeinflussen könnten, z. B. die Nase, muss in Fahrtrichtung die Radien von mindestens 38 mm (1,5 Zoll) aufweisen. Dieser minimale Radius muss mindestens fünfundvierzig Grad (45°), bezogen auf die vordere Richtung, entlang der oberen, seitlichen und unteren Rändern aller betroffenen Kanten sein.

### T.6.1 Aufhängung

**T.6.1.1** Das Auto muss mit einer voll funktionsfähigen Federung mit Stoßdämpfern, vorn und hinten ausgerüstet sein. Ein nutzbarer Federweg von mindestens 50,8 mm (2 Zoll), 25,4 mm (1 Zoll) Einfederung und 25,4 mm (1 Zoll) Rückfederung, während der Fahrer im Auto sitzt, soll gewährleistet sein. Die Jury behält sich das Recht vor Teams zu disqualifizieren, die nicht einen

ernsthafte Versuch unternommen haben ein betriebsfähiges Federungssystem, oder ein Federungssystem, welches für ein Autocross Rennen unangemessen ist, einzurichten.

### **T.6.2 Bodenabstand**

Die Bodenfreiheit muss ausreichen, damit kein Teil des Autos, mit Ausnahme der Reifen, während der Renndisziplinen, den Boden berühren. Vorsätzlicher oder übermäßiger Bodenkontakt eines beliebigen Teils des Autos, ausgenommen die Reifen, führt zum einbüßen eines Laufes oder das einbüßen einer ganzen dynamische Veranstaltung.

**Hinweis:** Die Zielsetzung dieser Vorschrift ist, dass gleitende Schürzen oder andere Vorrichtungen, die aufgrund der Konstruktion, der Verarbeitung oder ihrer Bewegungen die Rennstreckenoberfläche berühren, nicht eingesetzt werden dürfen. Jeder ungeplante Bodenkontakt, der entweder Schäden verursacht oder nach Ansicht der "dynamic event organizers" darauf hinauslaufen könnte, führt zum Ausschluss des betreffenden Teams von einem Einzelrennen oder sogar von dem gesamten Event.

Der 9. Abschnitt „Aerodynamische Hilfsmittel“ des Teils T „Allgemeine technische Anforderungen“ sieht für Aerodynamische Hilfsmittel von Formula Student Rennfahrzeugen folgende Regeln vor:

## **T9 Aerodynamische Hilfsmittel**

### **T9.1 Aerodynamik und Bodeneffekte - Allgemein**

Alle aerodynamischen Komponenten müssen die folgenden Anforderungen erfüllen:

### **T9.2 Position/ Platzierung**

**T9.2.1** In der normalen Ansicht, darf kein Teil der aerodynamischen Einrichtung, Flügel, Unterboden oder Splitter:

- a.** Weiter vorn als 762 mm (30 Zoll) vor den Fronten der Vorderreifen sein.
- b.** Nicht weiter hinten als 305 mm (12 Zoll) hinter der Rückseite des hinteren Reifens sein.
- c.** Nicht breiter als die Außenseite der Vorderreifen oder der Hinterreifen, je nachdem, welche breiter ist, auf der Höhe der Narben gemessen, sein.

### **T9.3 Minimale Radien der Kanten aerodynamischen Komponenten**

**T9.3.1** Alle Flügelkanten einschließlich Flügel, Endplatten, Gurneyleisten (wicker bills) und Unterboden, die einen Fußgänger kontaktieren könnten müssen einen Radius von mindestens 1,5 mm (0,060 inch) aufweisen.

**T9.4 Bodeneffekt-Komponenten**

Kein Leistungsgerät darf verwendet werden, um Luft unter dem Fahrzeug zu verschieben oder zu entfernen. Ausnahmen sind Lüfter, die ausschließlich für die Kühlung ausgelegt sind. Bodeneffekte, die durch Antriebskraft verursacht werden, sind verboten.

**T9.5 Anforderung an den Fahrer beim Ausstieg**

**T9.5.1** Austritt aus dem Fahrzeug innerhalb der Zeit, welche in Regel T4.8 "Fahrer Ausstieg" festgelegt ist, darf keine Bewegung (Verschiebung) der Flügel oder deren Halterungen verursachen.

**T9.5.2** Die Flügel müssen in solchen Positionen montiert werden, und stabil genug sein, dass kein Unfall in einer solchen Weise zu Verformungen der Flügel oder deren Halterungen führt, welche den Fahrerausstieg blockieren könnten [SAE13, S.59].

**2.3 Anforderungsliste**

In folgender Anforderungsliste werden die notwendigen Merkmale mit ihren zugehörigen Anforderungen tabellarisch erfasst. Dabei werden die vom Reglement der Formula Student geforderten Aspekte (*F*) und die von TMM diskutierten Vorstellungen (*W*) dargestellt. Während *F* ein Muss-Kriterium ist, sind mit *W* wünschenswerte Optionen gekennzeichnet.

<b>Merkmale</b>	<b>Anforderungen</b>	<b>F/W</b>
Sicherheit	Aerodynamik Komponenten, die in Kontakt mit Personen kommen können, müssen einen Mindestradius von 1,5mm haben.	F
	Fahrerausstieg darf nach einem Unfall nicht blockiert werden.	F
Funktion	Die aerodynamischen Anbauten sollen Abtrieb erzeugen.	W
	Auftrieb soll verhindert werden.	W
	Der Widerstand soll minimiert werden.	W
	Verstellung der Flügelposition realisieren.	W
Konstruktion	Vermeidung komplexer Geometrien für einfache Fertigung.	W
	So leicht wie möglich bauen, um die Trägheit des Wagens so klein wie möglich zu halten.	W
	Wenig Einzelteile, damit eine schnelle Montage und Demontage realisiert werden kann.	W
	Möglichst Kaufteile verwenden, um den Fertigungs- und Kostenaufwand klein zu halten.	W
Aerodynamik	Fließende Geometrien.	W
	Wenig Kanten.	W
Preis	Soll bei der grundlegenden Betrachtung der Aerodynamik zunächst nicht von großer Interesse sein. Bei der Endphase sollten jedoch Materialien und Fertigungsverfahren sorgfältig ausgewählt werden, um die Kosten klein zu halten.	W

Tabelle 2.2: Anforderungsliste



## 3 Strömungstechnische Grundlagen

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, werden hier lediglich solche Grundlagen näher erläutert, welche für die nachfolgenden Untersuchungen relevant sind.

Mit dem derzeitigen Wissensstand können Strömungsuntersuchungen noch nicht sofort analytisch mithilfe von Rechenleistung durchgeführt werden, da bei komplizierteren Geometrien sehr viele Einflüsse beachtet werden müssen, die meist nicht hinreichend analytisch beschrieben werden können. Zwar gibt es bereits analytische Betrachtungen für stark vereinfachte Spezialfälle, wo Rechnerleistungen annähernd gute Ergebnisse liefern [Küm07, S.303], [SS07, S.51]. Damit aber realistische Resultate erzielt werden, muss immer noch auf Untersuchungen in einem Windkanal zurückgegriffen werden, um gegebenenfalls eine Strömungssimulation zu bewerten. Hierbei werden Untersuchungen mit maßstabsgetreuen Modellen gemacht, weil die Vorbereitung und Untersuchung eines Modells in der Originalausführung einen erheblichen Mehraufwand bedeuten würden. Die gewonnenen Daten werden ausgewertet und in Ergebnissen formuliert. Diese Ergebnisse der Modellversuche müssen dann auf die Realgröße überführt werden. Dabei ist es jedoch wichtig, dass die Strömungen die Bedingungen der physikalischen Ähnlichkeit annähernd erfüllen, da ansonsten die Übertragung der Ergebnisse nicht realistisch ist. In Fällen, bei denen die physikalische Ähnlichkeit nicht erfüllt wird, sollte die strömungstechnische Untersuchung so weit wie möglich an das Original herangeführt werden, um brauchbare Werte zu erhalten, auch wenn der Kosten- und der Zeitfaktor dabei hoch ausfallen.

### 3.1 Ähnlichkeitstheorie

Durch die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie wird versucht, ein Zusammenhang zwischen den geometrischen und physikalischen Größen von zwei zu vergleichenden Strömungen bzw. zwei zu vergleichenden Modellen herzustellen. Das folgende Zitat aus [Küm07] konkretisiert dies.

„Die Aufgabe der Ähnlichkeitstheorie ist [...], die für das Verhalten eines Strömungsfeldes wichtigsten Größen zu erkennen, daraus geeignete dimensionslose Verhältnisse zu bilden und diese als Kennzahlen zu präsentieren [Küm07, S.50].“

Die Bedingungen der physikalischen Ähnlichkeit zweier Modelle sind:

1. das zu vergleichende Modell muss der Originalausführung geometrisch ähnlich sein, d. h., dass alle Längen-, Flächen-, Raum- und Oberflächenmaße verhältnismäßig gleich sein müssen (also maßstabsgetreu) [SS07, Geb12, S.65]. Dabei können

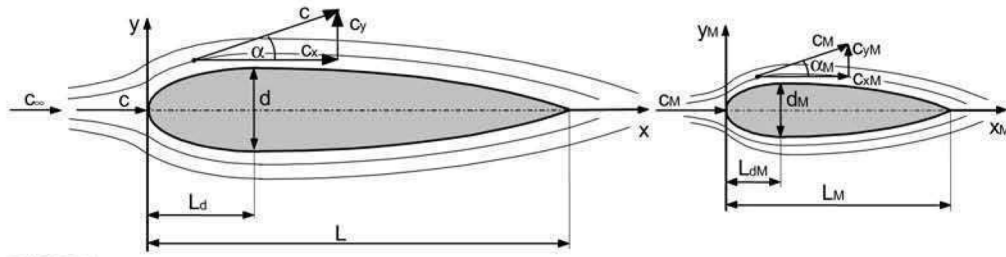


Abbildung 3.1: Geometrische und strömungstechnische Ähnlichkeit von zwei umströmten Profilen

Quelle: [SS07, S.66]

- Details, die als unbedeutend für den Versuch eingestuft werden, vernachlässigt werden, wobei man sorgfältig abwägen muss, ob dies zulässig ist [Her08, S.63].
2. wenn bei entsprechenden Punkten der zu vergleichenden Strömungsfelder die Verhältnisse der dort auftretenden physikalischen Größen gleich sind [Küm07, S.49].
3. die Ähnlichkeit der Geschwindigkeit, die Beschleunigung, die wirkenden Kräfte und die Stoffeigenschaften wie Dichte und kinematische Viskosität des Fluides müssen in einem bestimmten Verhältnis stehen [SS07, Geb12, S.65].
4. es müssen gleiche Anfangs- und Randbedingungen vorliegen [Her08, S.63].
5. alle dimensionlosen Kennzahlen müssen den selben Zahlenwert besitzen [Her08, S.63].

Wenn dieses gegeben ist, dann liegt eine strömungstechnische Ähnlichkeit vor. Die Abbildung 3.1 aus [SS07, S.66] zeigt die geometrische und strömungstechnische Ähnlichkeit von zwei umströmten Profilen. Hierbei bedeuten:

- $M$  ... Index für Modell
- $L, d$ , ... Hauptabmessung
- $\alpha$  ... Winkel der Geschwindigkeiten in einem korrespondierenden Punkt
- $c_\infty$  ... Anströmgeschwindigkeit und
- $c, c_x, c_y$  ... Geschwindigkeiten in einem korrespondierenden Punkt.

Um die Bedingungen der strömungstechnischen Ähnlichkeit zu erfüllen, müssen die Geschwindigkeiten der Originalausführung im gleichen Verhältnis zum Modell  $\frac{c}{c_M}, \frac{c_x}{c_{xM}}, \frac{c_y}{c_{yM}}$  stehen.

Um einen Zusammenhang zwischen den geometrischen und den physikalischen Größen der zu vergleichenden Strömungen herzustellen, werden je nach Anwendungsfall Ähnlichkeitskennzahlen genutzt. Sie sind dimensionslos und stellen Kraftverhältnisse dar. Es gibt viele Kennzahlen, die bei Strömungsuntersuchungen genutzt werden. Man kann sich auch für seine konkrete Fragestellung durch eine sogenannte Dimensions-

analyse<sup>2</sup> eigene Kennzahlen herleiten. Die wichtigsten Kennzahlen sind die Reynolds-, Froude- und die Mach-Zahl, die im Folgenden kurz erklärt werden.

### 3.1.1 Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl  $R_e$  ist eine dimensionslose Größe und sorgt für einen Vergleich zwischen den Trägheitskräften und den Reibungskräften in einem Fluid. Sie beschreibt, ob die Strömung laminar (bis  $Re_{\max}=2320$ ) oder turbulent (ab  $Re_{\min}=2320$ ) ist. Je größer die Reynolds-Zahl ist, desto dominanter ist die Trägheitskraft und desto weniger spielt die Zähigkeitskraft (Reibungskraft) eine Rolle (z.B. Tragflügel) [SS07, S.69]. Um die Messergebnisse eines Windkanals vom Modell auf die Großausführung sinnvoll zu übertragen, müssen gleiche (bzw. ähnliche) Strömungsverhältnisse vorliegen. Diese liegen vor, wenn die dimensionslose Kennzahl, die Reynolds-Zahl, im Original und der Modellausführung gleich ist [Trz12, S.931].

$$\begin{aligned}
 R_e &= \frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\eta} \\
 &= \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}}
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{array}{ll}
 R_e & \text{Reynolds-Zahl} \\
 u & \text{Anströmgeschwindigkeit } [\frac{m}{s}] \\
 L & \text{charakteristische Länge [m]} \\
 \eta = \nu \cdot \rho & \text{dynamische Viskosität } [Pa \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s} = \frac{N \cdot s}{m^2}] \\
 \nu = \frac{\eta}{\rho} & \text{kinematische Viskosität } [\frac{m^2}{s}] \\
 \rho & \text{Fluidichte } [\frac{kg}{m^3}]
 \end{array}
 \quad (3.1)$$

Der Reynolds-Zahl wird bei diesen Untersuchungen die größte Bedeutung beigemessen, da bei dem Fluid Luft, welches wir ausschließlich nutzen werden, die Schwerkraft keine bemerkenswerte Rolle spielt und weil der Geschwindigkeitsbereich, in dem wir uns im Windkanal bewegen werden, bei maximal 90 km/h liegt.

### 3.1.2 Froude-Zahl

Die Froude-Zahl ist ein Ähnlichkeitskriterium bei Strömungen mit freier Oberfläche, wie Kanal-, Fluss- und Wellenströmungen, da bei dieser Art von Strömung die Schwerkraft eine große Rolle spielt [Geb12, SS07, S.68]. Sie bildet das Verhältnis von Trägheitskraft zu Schwerkraft, siehe Gleichung 3.2. Da die Schwerkraft bei Luft unwesentlich ist, wird die Froude-Zahl  $F_r$  in den Untersuchungen keine Rolle spielen.

$$F_r = \frac{u^2}{L \cdot g} = \frac{u}{\sqrt{L \cdot g}} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}}
 \quad
 \begin{array}{ll}
 g & \text{Erdbeschleunigung } [\frac{m}{s^2}] \\
 L & \text{charakteristische Länge [m]} \\
 u & \text{Anströmgeschwindigkeit } [\frac{m}{s}]
 \end{array}
 \quad (3.2)$$

<sup>2</sup> Wie eine Dimensionsanalyse funktioniert, wird im Buch „Strömungsmechanik“ von Heinz Herwig beschrieben. Siehe im Literaturverzeichnis [Her08, S.51ff].

### 3.1.3 Mach-Zahl

Die Mach-Zahl stellt ein Ähnlichkeitskriterium in der Gasdynamik dar und beschreibt das Verhalten von kompressiblen Gasströmungen mit merklichen Dichteänderungen [Küm07, S.50]. Die maximale Mach-Zahl, die bei den Untersuchungen auftreten könnte, würde bei einer Schallgeschwindigkeit von 1235 km/h bei trockener Luft und 20° Temperatur und der angenommenen Anströmgeschwindigkeit von 90 km/h, nach der Gleichung 3.3 bei  $M_a = \frac{u}{a} = \frac{90 \text{ km/h}}{1235 \text{ km/h}} = 0.072$  liegen. Sie spielt bei den aerodynamischen Untersuchungen von Rennfahrzeugen aus der Rennserie der Formula Student keine Rolle, da die Mach-Zahl  $M_a$  viel kleiner als die kritische Mach-Zahl  $M_{akrit}$  ist ( $M_a = 0,072 \ll M_{akrit} = 0,3$ ). Bei einer Mach-Zahl bis  $M_a \approx 0,3$  können Strömungen als inkompressible Strömung behandelt werden, bei höherer Mach-Zahl nimmt der Kompressibilitätseinfluss immer stärker zu, sodass die Strömung als kompressibel aufgefasst werden muss [Küm07, S.64].

$$M_a = \frac{u}{a_\infty} = \frac{\text{Anströmungsgeschwindigkeit}}{\text{Schallgeschwindigkeit}} \quad \begin{array}{ll} a & \text{Schallgeschwindigkeit } [\frac{m}{s}] \\ M_a & \text{Mach-Zahl} \\ u & \text{Anströmgeschwindigkeit } [\frac{m}{s}] \end{array} \quad (3.3)$$

$= \text{Dichteeinfluss}$

## 3.2 Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand ist eine den Körper behindernde Kraft, die auftritt, wenn ein Objekt durch ein bestimmtes Fluid bewegt wird, oder das Fluid selbst den Körper umströmt [SS07, S.270]. Die Widerstandskraft ist abhängig von der Geometrie und der Oberflächenbeschaffenheit des umströmten Körpers, sowie vom strömenden Fluid [OBR11, S.30]. Sie wirkt also entgegengesetzt zur Strömungsrichtung und wird wie folgt berechnet:

$$F_W = c_W \cdot \rho \cdot A_p \cdot \frac{u^2}{2}$$

$c_W$	Widerstandsbeiwert
$u$	Anströmgeschwindigkeit $[\frac{m}{s}]$
$A_p$	Projizierte Fläche bzw. Stirnfläche des Körpers $[m^2]$
$F_W$	Widerstandskraft $[N]$
$\rho$	Fluiddichte $[\frac{kg}{m^3}]$

(3.4)

Der Widerstandsbeiwert ( $c_W$ -Wert) stellt eine dimensionslose Größe für den Strömungswiderstand eines von einem Fluid umströmten Körpers dar. Der  $c_W$ -Wert ist von der Körperform, vom Einstellwinkel  $\alpha$ , von der Reynolds-Zahl  $Re$ , sowie von der Mach-Zahl  $M_a$  abhängig [Her08, S.189]. Er wird in der Regel experimentell (z.B. in einem Strö-

mungskanal) ermittelt. Der Körper steht dabei auf einer Platte, die mit Kraftsensoren ausgestattet ist. Die Kraft in Richtung der Anströmung wird gemessen. Größen wie Luftdichte, Stirnfläche und Anströmgeschwindigkeit sind bekannt und über die Formel 3.5 wird der Widerstandsbeiwert errechnet. Die Gleichung 3.5 gilt für inkompressible Flüssigkeiten sowie für Gase bis  $M_a \leq 0,3$ . Bei Gasströmungen muss die Kompressibilität ab  $M_a > 0,3$  berücksichtigt werden.

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho \cdot u^2 \cdot A_p} \quad (3.5)$$

$c_W$	Widerstandsbeiwert
$u$	Anströmgeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]
$A_p$	Projizierte Fläche bzw. Stirnfläche des Körpers [ $m^2$ ]
$F_W$	Widerstandskraft [N]
$\rho$	Fluiddichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

### 3.3 Abtrieb

Die Abtriebskraft wirkt in Richtung der Gewichtskraft und entsteht dadurch, dass eine Druckdifferenz über und unterhalb eines Fahrzeugteils entsteht. Diese Druckdifferenz entsteht dadurch, dass die Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Teils kleiner ist und unterhalb größer. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit erreicht man durch das Verkleinern des Strömungsquerschnitts (Düseneffekt) oder durch das Einleiten von heißer Luft unter einer Fahrzeugkomponente [Trz12, S.140]. Dadurch entsteht ein hoher Druck oberhalb der Fahrzeugkomponente, während sich unterhalb ein niedrigerer Druck als der Umgebungsdruck einstellt [Her08, S.188 f.]. Die Abbildung 3.2 aus [Trz12, S.140] verbildlicht dies.

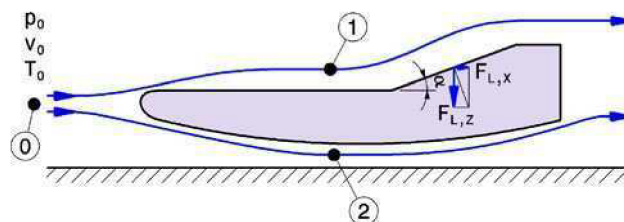


Abbildung 3.2: Die Entstehung des Abtriebs

Quelle: [Trz12, S.140]

Dadurch, dass der Druck auf der unteren Profilseite geringer wird, entsteht dort ein Unterdruck. Dieser bewirkt, dass z.B. ein Rennfahrzeug nach unten gezogen wird. Die sogenannte Abtriebskraft wird wie folgt berechnet:

$$F_A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A_R \quad (3.6)$$

$c_A$	Auftriebsbeiwert
$F_A$	Abtriebskraft [N]
$A_R$	Referenzfläche [m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Dichte der Luft [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
$u$	Anströmgeschwindigkeit [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

Der in der Formel auftretende Auftriebsbeiwert ( $c_A$ -Wert) ist eine dimensionslose Größe und gibt an wie groß der dynamische Abtrieb eines Körpers ist, wenn die Geschwindigkeit und die Richtung gegeben sind. Er ist abhängig vom Einstellwinkel  $\alpha$ , von der Reynolds-Zahl  $Re$ , sowie von der Mach-Zahl  $Ma$  [Her08, S.189]. Er lässt sich wie folgt berechnen:

$$c_A = \frac{2 \cdot F_A}{\rho \cdot u^2 \cdot A_R} \quad (3.7)$$

$c_A$	Auftriebsbeiwert
$F_A$	Abtriebskraft [N]
$A_R$	Referenzfläche [m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Fluidichte [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
$u$	Anströmgeschwindigkeit [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

Für die Auslegung des Rennwagens soll ein negativer Auftrieb, also Abtrieb, realisiert werden. Damit wird sicher gestellt, dass das Fahrzeug die Kurven mit höherer Geschwindigkeit, im Vergleich zum Fahrzeug ohne Anbauteile, passieren kann. Es wird versucht, durch die Formgebung des Rennwagens ein möglichst hohen Anpressdruck zu erzeugen, damit die Räder so viel Drehmoment wie möglich auf die Straße bringen können und damit die Reifen eine möglichst große Haftung auf der Straße erreichen [Trz12, S.127].

### 3.4 Probleme bei Modelluntersuchungen

Da alle großen Pkw-Hersteller die aerodynamischen Untersuchungen ihre Fahrzeuge im Originlamaßstab untersuchen, ist laut Herwig (2008) die Untersuchung im kleinen Maßstab als problematisch zu sehen [Her08, S.64]. Da in diesem Zusammenhang die Reynolds-Zahl  $Re$  die entscheidende Kennzahl ist, muss die Problematik der Modelluntersuchung bei dem Versuch eine gleiche Reynolds-Zahl zu erzeugen, liegen. Um eine Gleichheit der Reynolds-Zahl im Original und Modellversuch zu erreichen, muss nach der Gleichung 3.1  $u \cdot L$  in beiden Fällen gleich sein, solange die Modellversuche in Luft bei gleichen Druck- und Temperaturbedingungen gemacht werden [Her08, S.64]. Da  $u \cdot L$  gleich sein muss, muss z.B in einem Maßstab 1:15 die charakteristische Größe<sup>3</sup> des Modells  $L_M = \frac{L_O}{15}$  sein und die Anströmgeschwindigkeit  $u_M = 15 \cdot u_O$  sein. Hierbei

<sup>3</sup> charakteristische Größe: wird z.B ein Diffusor mit festem Öffnungswinkel und fester realtiver Länge untersucht, so sind alle untersuchten Diffusoren geometrisch ähnlich und durch eine charakteristische Länge, z.B. den Eintrittsdurchmesser festgelegt [Her08, S.54].

stehen die Indizes O und M für Original und Modell. Um eine Originalfahrt bei 90 km/h nachzubilden, muss also das Modell mit einer Anströmgeschwindigkeit von  $u = 1350$  km/h beaufschlagt werden. Dabei entsprechen die 1350 km/h einer Mach-Zahl nach der Gleichung 3.3 von  $M_a = 1,09$  und damit liegen verschiedene physikalische Situationen vor. Diese verschiedenen physikalischen Situationen liegen vor, weil ab  $M_a \geq 0,3$  die Strömung als kompressibel und ab  $M_a \leq 0,3$  die Strömung als inkompressibel angenommen werden muss. Damit beschreibt das physikalisch/mathematische Modell die physikalisch ähnlich unterstellten Situationen, die in der Modellströmung vorliegen, nicht hinreichend genau [Her08, S.64 f.]. Dieses wird als Skalierungseffekt bezeichnet [Her08, S.64 f.].

Die Anpassung der Reynolds-Zahl kann auch über die Stoffwerte vorgenommen werden. Dabei müssen das Original und das Modell von unterschiedlichen Fluiden umströmt werden oder es muss die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Stoffwerte eines gemeinsamen Fluides genutzt werden [Her08, S.65].

Da wir in der Hochschule Mittweida die Anpassung der Stoffwerte nicht vornehmen können, ist es uns nicht möglich, die Reynolds-Zahlen der Modellströmung und des Originals anzugleichen. Wir müssen uns daher bei den aerodynamischen Untersuchungen auf verschiedene Modelle konzentrieren, wobei bei diesen gute Abtriebs- und Widerstandswerte erreicht werden sollen. Das Original soll möglichst dem besten Modell maßstabsgetreu nachgebaut werden. Da wir in diesem Zusammenhang die Reynolds-Zahl vernachlässigen müssen, werden die Abtriebs und Widerstandswerte, die bei den Untersuchungen mit dem Modell aufgenommen werden, nicht genau an die Originalausführung zu übertragen sein. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese hoch skalierte Form auch in der Großausführung ein Optimum darstellt, sodass diese Form in der Originalausführung das beste Verhältnis von Antrieb und Widerstand liefert.

Wenn man die Reynolds-Zahl in Abhängigkeit vom Widerstandswert in einem Graphen darstellt, dann erkennt man, dass der Widerstandswert eines Objektes in einem gewissen Bereich der Reynolds-Zahl annähernd konstant ist. Man kann dem Diagramm aus der Abbildung 3.3, welche den Widerstandsbeiwert einer Kugel, Kreiszylinder und Kreisscheibe in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl darstellt, entnehmen, dass der Widerstandsbeiwert sich bei den nach der Gleichung 3.1 erhaltenen Reynolds-Zahlen für die Originalausführung und das Modell nicht groß unterscheidet. Es gibt also einen großen Bereich, in dem die Reynolds-Zahlen vom Original und Modell sich deutlich unterscheiden, der Widerstandsbeiwerte jedoch nahezu konstant bleibt. Da wir jedoch kein passendes Diagramm für so eine spezielle Form, welche der Rennwagen in dieser Hinsicht aufweist, zur Verfügung haben und auch nicht die Möglichkeiten haben, solche Diagramme herzustellen, muss davon ausgegangen werden, dass die Widerstandsbeiwerte zwischen Original und Modell nahezu gleich sind. Dazu schreibt Kümmel:

„Kraftfahrzeuge sind im allgemeinen Körper mit stumpfen Hinterkanten,

die definierte Ablösestellen erzeugen, so daß weitgehende Kennzahlunabhängigkeit vorliegt:  $c_W \approx \text{konst.}$ “ [Küm07]

Dieses Zitat sowie das Diagramm in der Abbildung 7.2 bestätigen die vorhergehende Annahme, dass die Widerstandbeiwerte zwischen Original und Modell als gleich betrachtet werden können. In dem Diagramm der Abbildung 7.2 kann man ebenfalls erkennen, dass trotz ansteigender Anströmgeschwindigkeit der  $c_W$ –Wert nahezu konstant bleibt.

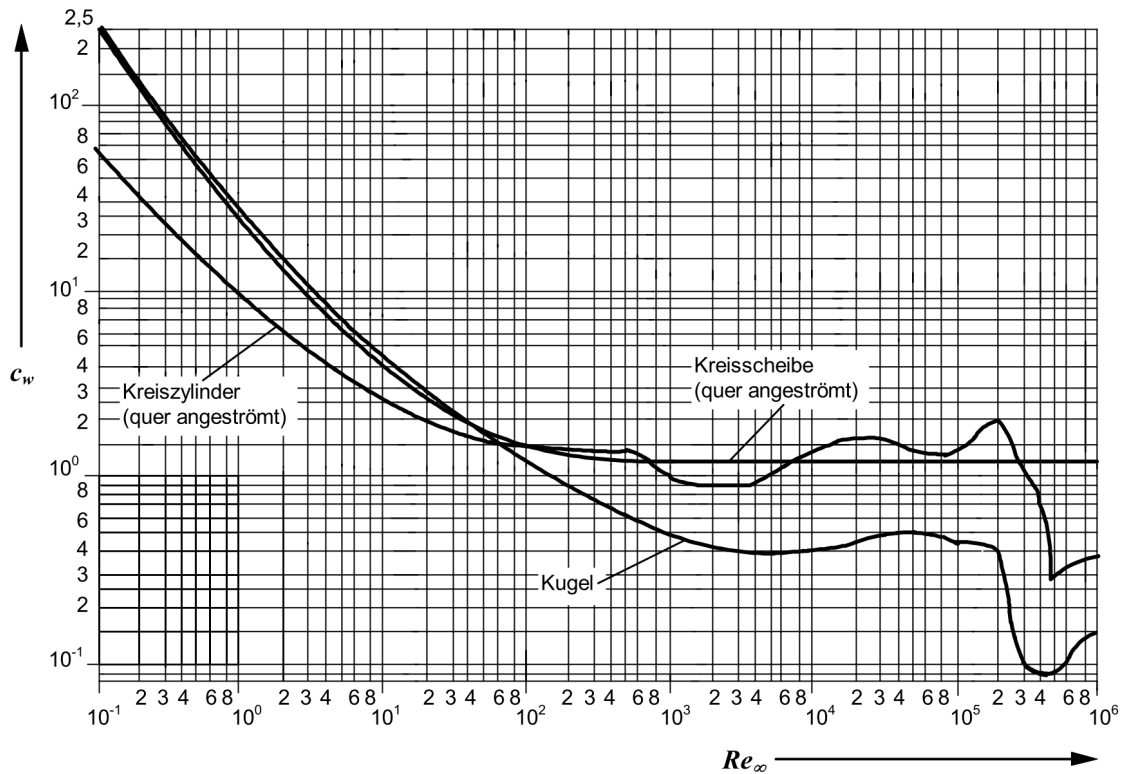


Abbildung 3.3: Widerstandbeiwert  $c_W$  von Kugel, Kreiszylinder und Kreisscheibe in Abhängigkeit von der Reynoldszahl  $Re$

Quelle: [UM13]



## 4 Stand der Technik

Aerodynamische Betrachtungen fanden schon im frühen zwanzigsten Jahrhundert statt. Im Automobilbereich bestand immer ein Konflikt zwischen einer aerodynamisch effektiven Form und des Geschmacks der kaufkräftigen Kunden. In der Vergangenheit wurden Autos mit sehr guten Widerstandsbeiwerten produziert und seit einigen Jahren ist die Betrachtung der Aerodynamik des Automobils, aufgrund des Kraftstoffverbrauchs und der immer strengeren Emissionsgesetzen, wieder in den Vordergrund gerückt [Huc05].

Nun geht es in dieser Arbeit nicht allgemein um die Aerodynamik eines Automobils, sondern um die eines Rennwagens in der Formula-Student-Klasse. Hierbei gibt es sehr starke Unterschiede. Während bei dem klassischen Automobil der Geschmack des potentiellen Käufers und der Kraftstoffverbrauch eine große Rolle spielt, geht es bei den Rennwagen in der Formula Student Klasse weitgehend um Fahrleistung und Fahrstabilität. Das Verhältnis zwischen Abtrieb und Widerstand sollte einen möglichst großen Wert erreichen, ohne dass dabei das Reglement missachtet wird. Es kommt also nicht rein auf einen sehr kleinen Widerstandsbeiwert an, sondern auf eine optimale Kombination zwischen den negativen Auftriebsbeiwert  $c_A$  und dem Widerstandsbeiwert  $c_W$ . Rennwagen der Formel 1 beispielsweise haben einen  $c_W$ -Wert von ca.  $c_W = 1,2$  während normale Straßenfahrzeuge bei ca.  $c_W = 0,25 \dots 0,42$  liegen<sup>4</sup>. Formel Fahrzeuge erzeugen aber durch ihre aufwendige Geometrie einen hohen Anpressdruck, sodass sie Kurven, im Vergleich zu normalen Automobilen, ohne seitliches Ausbrechen mit hoher Geschwindigkeit passieren können. Frontflügel, Heckflügel und Diffusor sorgen zwar für einen relativ schlechten  $c_W$ -Wert, jedoch erzeugen sie den benötigten Anpressdruck um die Fahrbarkeit des Rennwagens bei sehr hohen Geschwindigkeiten zu ermöglichen. Weiterhin heißt es nicht, dass ein Formel Rennwagen unbedingt einen größeren Widerstand als ein Serienfahrzeug verspürt, denn maßgeblich für den Widerstand ist auch die Stirnfläche des Fahrzeugs, siehe dazu die Gleichung 3.4. Da ein Formel Fahrzeug viel flacher und kompakter gebaut ist, ist die Stirnfläche deutlich kleiner als beim normalen Straßenfahrzeug. So wird bei dieser Arbeit nicht versucht, einen Rennwagen mit einem möglichst niedrigem  $c_W$ -Wert zu konzipieren, sondern einen Rennwagen, der durch seine zusätzlichen aerodynamischen Anbauten einen hohen Anpressdruck erzeugt und dennoch keinen allzu großen Widerstand erfährt. Es sollte dabei beachtet werden, dass gegebenenfalls eine niedrigere Maximalgeschwindigkeit auf geraden Streckenabschnitten erreicht wird, da aufgrund der begrenzten Leistung des Motors ein zu hoher Widerstand nicht kompensiert werden könnte.

<sup>4</sup> Diese  $c_W$ -Werte sind in diversen Internetseiten zu finden. Beispiele dafür sind: <http://www.autobild.de/artikel/autos-im-windkanal-666465.html> und <http://rc.opelgt.org/indexcw.php> sowie <http://derstandard.at/2320858/cw-Wert-in-der-Formel-1>

## 4.1 Wirkungsweise von aerodynamischen Komponenten

Heutzutage werden im Rennsport diverse aerodynamischen Elemente eingesetzt, die zum Erzeugen des Abtriebs und zum Kühlen von einigen Komponenten (z.B. Motor, Bremsen) genutzt werden. Es werden auch Elemente wie etwa Leitbleche eingesetzt, mit denen versucht wird die Strömung so zu leiten, dass diese nicht von den Konturen abreißt. Ein Abreißen der Strömung von der Oberfläche des Rennwagens äußert sich als Leistungsverlust, weil das Auto nicht optimal umströmt wird. Es werden Anbauten wie Unterboden, Diffusor, Front- und Heckflügel für die Erzeugung von Abtrieb genutzt. Während Anbauten wie Schürzen, Abweiser, Einlassöffnungen und Splitter genutzt werden, um die Strömung durch das Fahrzeug oder um bestimmte Konturen zu leiten. Der Unterboden verursacht bei einem Formel 1 Wagen (Ferrari F1-2000) nach Trzesniowski beispielsweise nur einen Luftwiderstand von 10%, sorgt aber mit 41% für einen wesentlichen Beitrag zum Abtrieb [Trz12, S.130]. Ein nach hinten leicht ansteigender Unterboden und ein Diffusor im Fahrzeugheck beschleunigen die Luftströmung und sorgen für einen hohen Abtrieb und für einen geringeren Widerstand [Trz12, S.155 f.]. In der Abbildung 4.1 ist dieses Schema dargestellt. Dieser besitzt laut Trzesniowski ein Verhältnis von Abtrieb zum Widerstand von  $\frac{c_A}{c_w} = 10,9$ , der die aerodynamische Effizienz<sup>5</sup> widerspiegelt [Trz12, S.130].

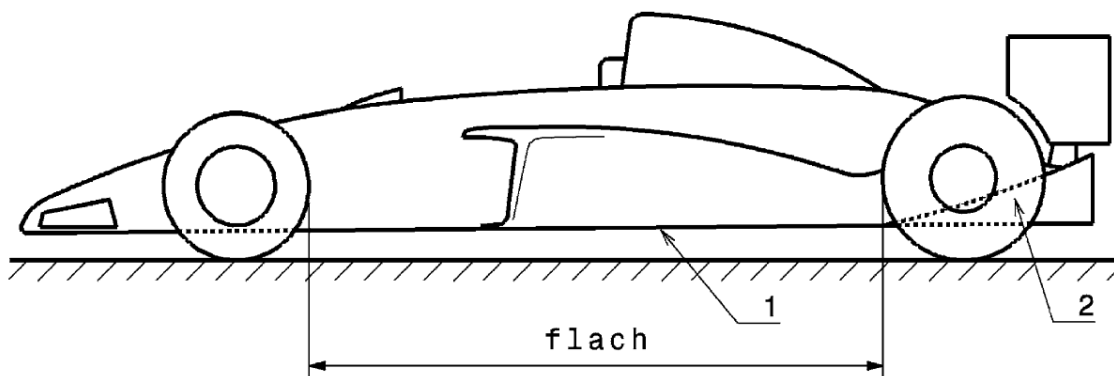


Abbildung 4.1: Schema eines Fahrzeugs mit flachem Unterboden  
1 flacher Abschnitt des Unterbodens, 2 Diffusorbereich

Quelle: [Trz12, S.156]

Weiterhin sind der Frontflügel und der Heckflügel wirkungsvoll, wobei der Heckflügel nach Trzesniowski zusätzlich als Einstellelement an der Rennstrecke für ein gewünschtes Abtrieb/Widerstandsverhältnis genutzt werden kann [Trz12, S.130]. Auch kann ein Heckflügel eine Abtriebskraft in der Formel 1 bis zu 9,8 kN auf langen Geraden erzeugen [Trz12, S.149 f.]. Der Frontflügel kann laut Trzesniowski bei langen Geraden beispielsweise 5,5 kN erzeugen.

<sup>5</sup> Als aerodynamische Effizienz wird das Verhältnis Abtrieb zu Luftwiderstand bezeichnet.

Strömungstechnisch gesehen ist auch eine Verkleidung der Räder von Vorteil, während offene Räder sich negativ auf die aerodynamische Effizienz auswirken. Der Tabelle 4.1 und der Abbildung 4.2 aus Trzesniowski kann man die Beiträge von Fahrzeugkomponenten des Ferrari F1-2000 zu Luftwiderstand und Abtrieb entnehmen, um einen Einblick zu bekommen in welchem Bereich sich die Rennwagen der Formel 1 bewegen.

Komponente	Luftwiderstand		Abtrieb		$c_A/c_W$ [-]
	$c_W$	Anteil [%]	$c_A$	Anteil [%]	
Frontflügel	0,123	13,2	0,9699	36,9	7,859
Heckflügel	0,297	31,8	0,899	34,4	3,029
Unterboden	0,099	10,6	1,080	41,3	10,911
Vorderräder	0,150	16,0	-0,038	-1,4	-0,251
Hinterräder	0,187	20,1	-0,061	-2,3	-0,326
Leitbleche (barge boards)	0,023	2,4	-0,020	-0,8	-0,889
Rest	0,055	5,9	-0,210	-8,0	-3,793
Gesamt	0,934	100	2,617	100	2,802

Tabelle 4.1: Beiträge von Fahrzeugkomponenten zu Luftwiderstand und Abtrieb

Quelle: [Wre03, Trz12]

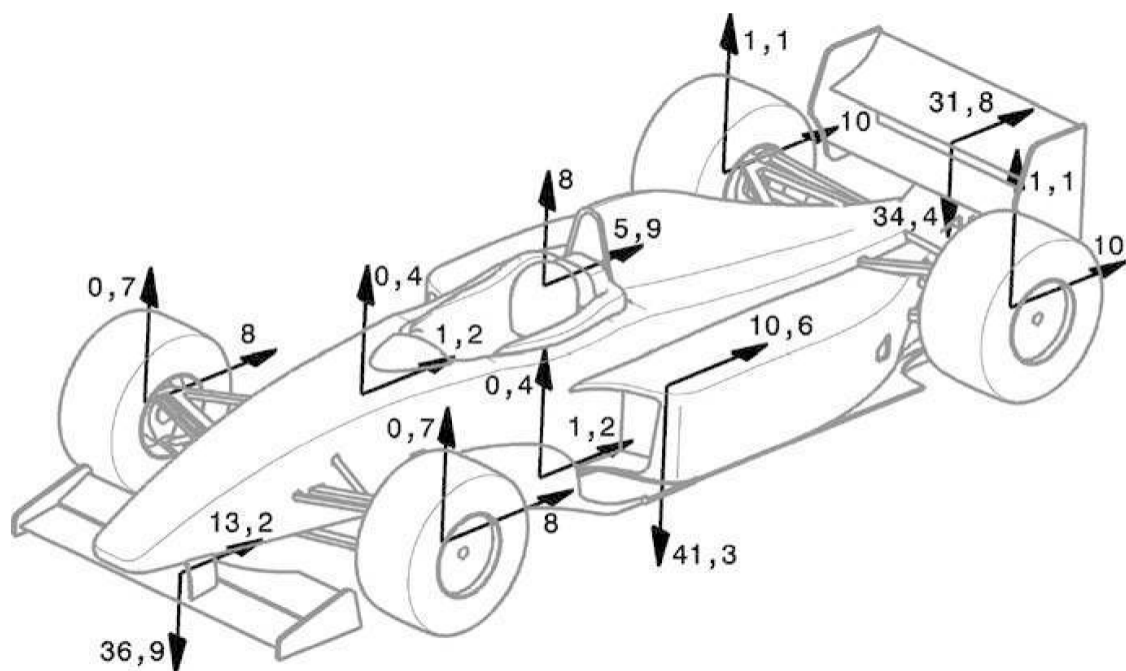


Abbildung 4.2: Luftwiderstand und Auftrieb von Fahrzeugteilen

Beiträge zu Luftwiderstand und Auftrieb von Fahrzeugteilen (Ferrari F1-2000). Angaben in %. Die Werte beziehen sich auf eine mittlere Abtriebseinstellung und 16/46 mm Bodenabstand vorne/hinten. Die Zahlen am Fahrerhelm stehen für alle übrigen Teile des Fahrzeugs.

Quelle: [Wre03, Trz12]

In manchen Rennklassen werden sogar die Radaufhängungen aerodynamisch betrachtet. Dabei werden Querlenker und Schubstangen mit der Form eines Tragflächenprofils

konstruiert, um den Luftwiderstand zu reduzieren und um die Luftströmung so zu beeinflussen, dass diese z.B. zum Heckflügel strömt, um dort Abtrieb zu erzeugen [Trz12, S.134]. Nach [Trz12, S.138] senkt sich der Widerstandsbeiwert von frei stehenden Überrollbügel um das 10-Fache, wenn diese strömungsgünstig (z.B. Tropfenform) verkleidet werden.

Weitere nützliche abtriebserzeugende Mittel sind nach [Trz12, S.138 ff.]:

- Eine abgesenkte Nase mit einem keilförmigen Bug<sup>6</sup>, da diese für einen zusätzlichen Abtrieb an der Fahrzeugfront sorgt.
- Auch ein sogenannter Splitter, also ein flaches, kleines Stück Blech mit einer tropfenförmigen Vorderkante, kann für Abtrieb an der Front sorgen. Seine Hauptaufgabe ist es jedoch, den Luftstrom an Staudruckbereichen zu teilen. Meist befindet sich der Splitter im Bugbereich.
- Den Bereich unter den Seitenkästen wie Tragflügel eines Flugzeugs mit einem auf dem Kopf gestellten Profil auszulegen, um zusätzlichen Abtrieb zu erzeugen.
- Ein schlanker Rumpf, damit die Seitenkästen als Flügel möglichst breit werden.
- Ein möglichst schmales Heck und ein vollständig verkleideter Motor, damit der Luftstrom ungehindert unter dem Fahrzeug austreten kann.
- Schürzen zu benutzen. Sie dienen dazu, den seitlichen Bereich der Seitenkästen gegen Luft abzudichten, um so eine Luftverwirbelung unter dem Fahrzeug zu vermeiden.
- Endplatten zu benutzen. Sie werden seitlich an die Flügel angebracht, damit die Luft nicht seitlich über die Flügelenden strömen kann, was normalerweise durch den Überdruck auf der Oberseite und den Unterdruck auf der Unterseite geschieht. Diese Endplatten sorgen laut Trzesniowski für eine Erhöhung des Abtriebs um bis zu 30% (siehe Abbildung 4.3).
- Mehrteilige Flügel anzuwenden, da diese eine größere Wölbung aufweisen und somit einen größeren Abtrieb erzeugen. Das Schema des mehrteiligen Flügels wird in der Abbildung 4.4 gezeigt.

Einzelne Kennwerte sind nach Trzesniowski nicht ausschlaggebend. Besonders sei es, das Rennfahrzeug als Ganzes zu betrachten.

---

<sup>6</sup> Bug = Front des Rennwagens

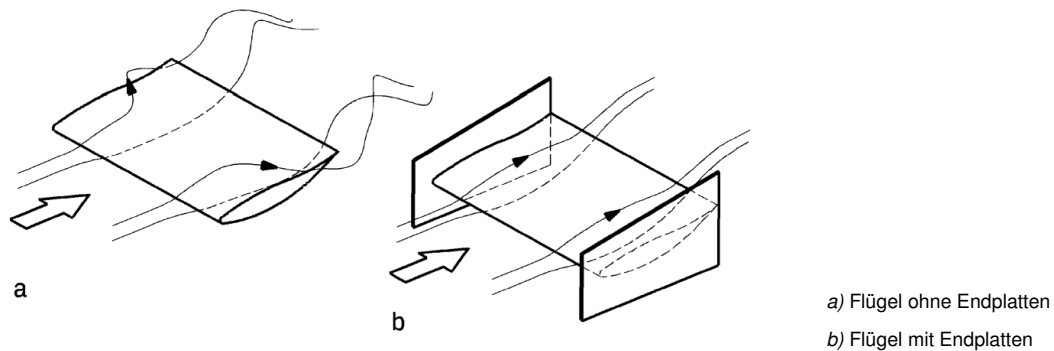


Abbildung 4.3: Wirkung von Endplatten

Quelle: [Trz12, S.147]

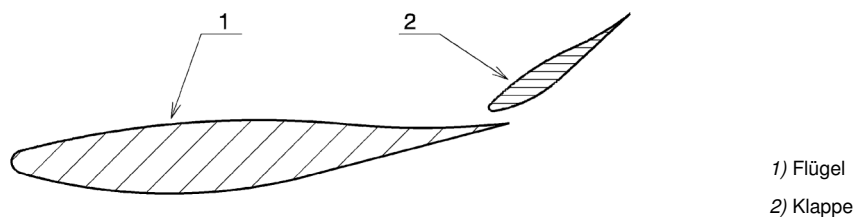


Abbildung 4.4: Schema eines zweiteiligen Flügels

Quelle: [Trz12, S.146]

## 4.2 Herstellung der aerodynamischen Komponenten

Die aerodynamischen Komponenten erfahren eine relativ geringe Belastung (ca.  $0,55 \frac{N}{cm^2}$ ), obwohl sie teilweise sehr hohe Abtriebskräfte erzeugen [Trz12, S.147]. Dies ermöglicht einen Leichtbau der Komponenten. Es werden heutzutage meist zwei Verfahren zu Herstellung von Teilen (z.B. Flügel) genutzt. Zum einen werden Teile aus Faserverbundwerkstoffen (CFK<sup>7</sup>, GFK<sup>8</sup>) hergestellt und verbaut, da sie eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und eine gute Oberfläche besitzen und dabei noch leicht sind. Zum anderen werden dünne Aluminiumbleche (z.B. 0,5mm Dicke) um eine Form, etwa aus Holz, gewickelt und z.B. genietet. Das Wichtigste bei diesen Verfahren ist es, möglichst leicht zu bauen und eine möglichst gute Oberfläche zu erzeugen, da jede Unförmigkeit, wie z.B. ein Nietkopf auf der umströmten Oberfläche, die Strömung zum Ablösen bringen kann, welches sich negativ auf den Versuch, einen Abtrieb zu erzeugen, auswirkt [Trz12, S.146 f.].

<sup>7</sup> Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

<sup>8</sup> Glasfaserverstärkter Kunststoff

### 4.3 Numerische Strömungsmechanik

Analytische Herangehensweisen durch moderne Rechenprogramme (CFD<sup>9</sup>-Simulationen) ermöglichen zusammen mit 3D CAD-Modellen die Berechnung der Fahrzeugströmung. CFD-Simulationen sind schon weit ausgeklügelt, müssen aber noch durch Experimente bestätigt werden. Der Windkanal liefert die Größenordnung der Werte, während die Simulationsrechnung dafür genutzt wird, qualitative Aussagen über Änderungen am Fahrzeug zu machen [Trz12, S.182]. Für einzelne Spezialfälle kann die CFD-Technik, auch ohne vorhergehende Experimente, nahezu bedenkenlos angewendet werden.

---

<sup>9</sup> CFD (Computational Fluid Dynamics) ist eine etablierte Methode in der numerische Strömungsmechanik.

## 5 Konstruktion eines Modells des Formelrennwagens im Maßstab 1:15

Das Referenzmodell, welches in der Abbildung 5.1 zu sehen ist, ist nach den Regeln der Formula SAE, wie in 2.2 beschrieben, konzipiert. Es ist eine vereinfachte aber maßstabsgetreue Variante des Rennwagens vom TMM aus dem Jahr 2013. Dabei wurden Details wie die Wandstärke der Seitenkästen, die Räder, Achsen, der Motor oder die Überrollbügel vereinfacht dargestellt. Andere Komponenten, wie z.B. die Radaufhängung und der Kühler, wurden gar ganz weggelassen, da die Druckqualität des verwendeten Druckers hierfür nicht ausreicht. Trotz präziserer Untersuchungsergebnisse bei größeren Modellen, beispielsweise im Maßstab 1:5 oder 1:10, wurde der Maßstab 1:15 gewählt, da sowohl der Testraum im Windkanal als auch der Druckbereich des 3D-Druckers keinen kleineren Maßstab zuließen.

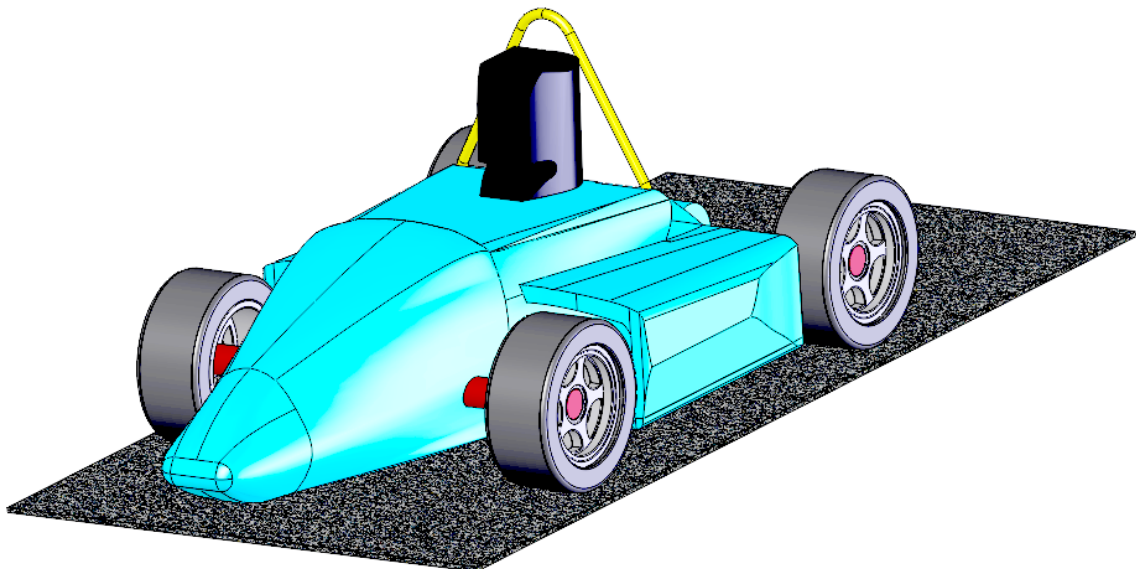


Abbildung 5.1: Referenzmodell mit dem Maßstab 1:15

Im Folgenden wird die Konstruktion des Unterbodens, des Diffusors und die des Front- und Heckflügels näher erläutert.

### 5.1 Bodeneffekt

Der Bodeneffekt ist ein strömungstechnisches Phänomen, welches von Vögeln im Tiefflug, Flugzeugen und Rennwagen genutzt wird, um Energie zu sparen bzw. um besonders effizient in Bodennähe zu sein. Bei Rennwagen sorgt der Effekt dafür, dass das Fahrzeug kräftiger an den Boden gepresst wird, während der Widerstand nahezu

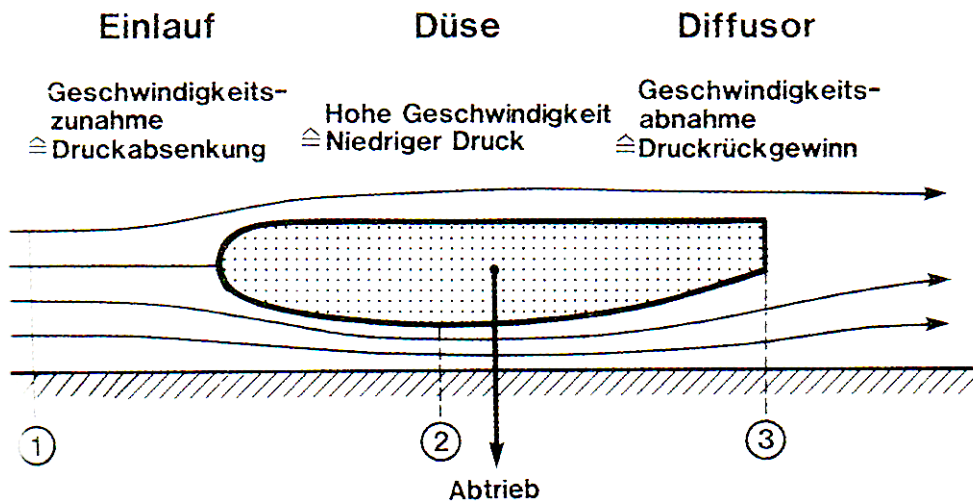


Abbildung 5.2: Prinzip des Bodeneffekts

Quelle: [Huc05, S.527]

gleich bleibt. Die Effizienz des Wagens steigt somit stark an. Das Prinzip des Bodeneffekts ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Dabei gibt es den Bereich des Einlaufs, bei dem die Geschwindigkeit zunimmt, den Bereich der Düse, bei dem die Geschwindigkeit beschleunigt wird und den Bereich des Diffusors, der durch die Querschnittserweiterung für eine Geschwindigkeitsabnahme sorgt [Huc05, S.526 f.].

Der Bodeneffekt ist in zwei Komponenten zu unterteilen. Einerseits gibt es den spannenweitenbezogenen Bodeneffekt, welcher in einer Reduktion von induziertem Widerstand<sup>10</sup> resultiert, andererseits den längenbezogenen Bodeneffekt, welcher für einen größeren Abtrieb verantwortlich ist [Huc05, S.526]. Der spannenweitenbezogene Bodeneffekt spielt im Wesentlichen bei Flugzeugen sowie bei dem Front- und Heckflügeln an Rennwagen eine Rolle und ist wie folgt zu erklären: An den Flügelenden findet der Druckausgleich statt. Dort treffen der Bereich des Überdrucks und der des Unterdrucks aufeinander. Als Folge entsteht eine Ausgleichsströmung aus der Überdruckzone in Richtung der Unterdruckzone, woraus eine Verwirbelung an den Flügelenden resultiert. Diese Verwirbelungen werden in der Aerodynamik als Wirbelschleppen bezeichnet. Sie führen dazu, dass Energie verloren geht. Dieser Energieverlust wird als induzierter Widerstand bezeichnet. Ist der Bodenabstand vom Fahrzeug zum Unterboden oder zum Frontflügel richtig gewählt, kommt es bei der Umströmung der Flügel dazu, dass die Verwirbelungen keinen Platz haben, sich nach unten auszubreiten, weil der Boden dies verhindert. Laut Hucho reduziert sich dabei der induzierte Widerstand und der Abtrieb steigt an [Huc05, S.526]. In der Abbildung 5.3 ist die Abhängigkeit des Abtriebs vom Bodenabstand dargestellt. Es wird deutlich, dass ein Maximum an Abtrieb bei einem gewissen Bodenabstand vorhanden ist, der jedoch bei jedem Fahrzeug erst durch Testen herausgefunden werden muss.

<sup>10</sup> induziertem Widerstand ist der Widerstand, der durch Verwirbelung an den Flügelenden entsteht.



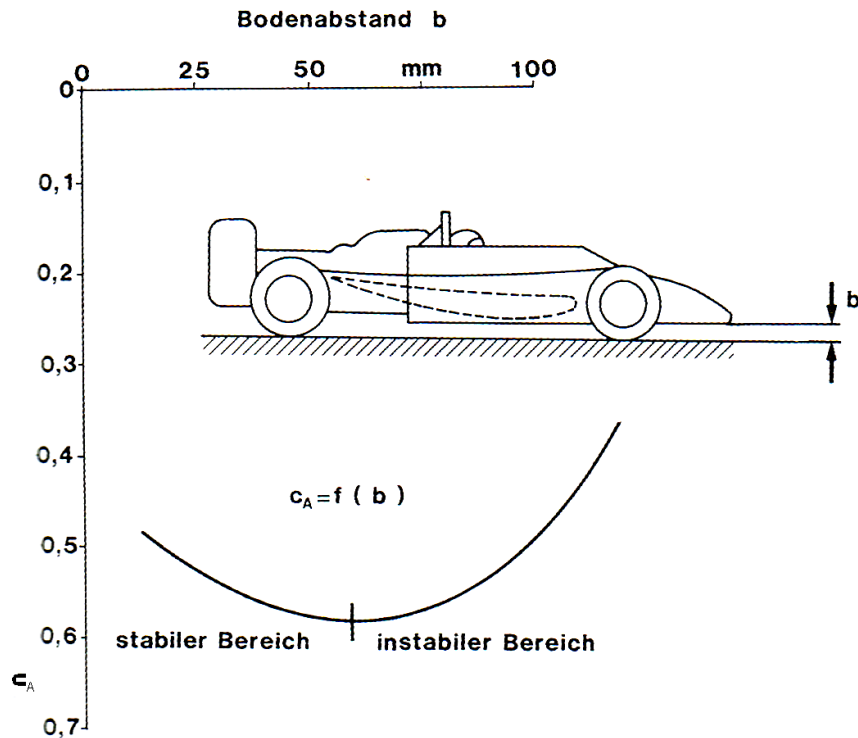


Abbildung 5.3: Abhängigkeit des Abtriebs vom Bodenabstand

Quelle: [Huc05, S.527]

Für den wesentlichen Bodeneffekt sorgt jedoch der längenbezogenen Bodeneffekt, der laut [Huc05, S.526] maßgeblich von der Fahrzeugunterseite (Frontflügel, Unterboden und Diffusor) abhängig ist. Dies führt dazu, dass sich die Luft im kleinsten Querschnitt, der zwischen Boden und Unterboden bzw. zwischen Frontflügel und Unterboden befindet, staut und somit eine Düse nach Venturi zwischen der Fahrbahn und dem Unterboden gebildet wird. Der Venturi-Effekt sorgt dafür, dass die Strömung unterhalb des Fahrzeugs beschleunigt wird. Es wird bei diesem Vorgang oberhalb des Flügels die Strömung abgebremst. Dadurch steigt vor dem kleinsten Querschnitt der Druck an und dahinter wieder ab, während oberhalb ein Luftpolster entsteht, das die Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Profils abbremst, was zu einem größeren Druckunterschied führt und wiederum in einer Verstärkung des Abtriebs resultiert. In der Abbildung 5.4 ist der Bodeneffekt zu sehen, der beim angewendeten Heckflügelprofil entstehen würde.

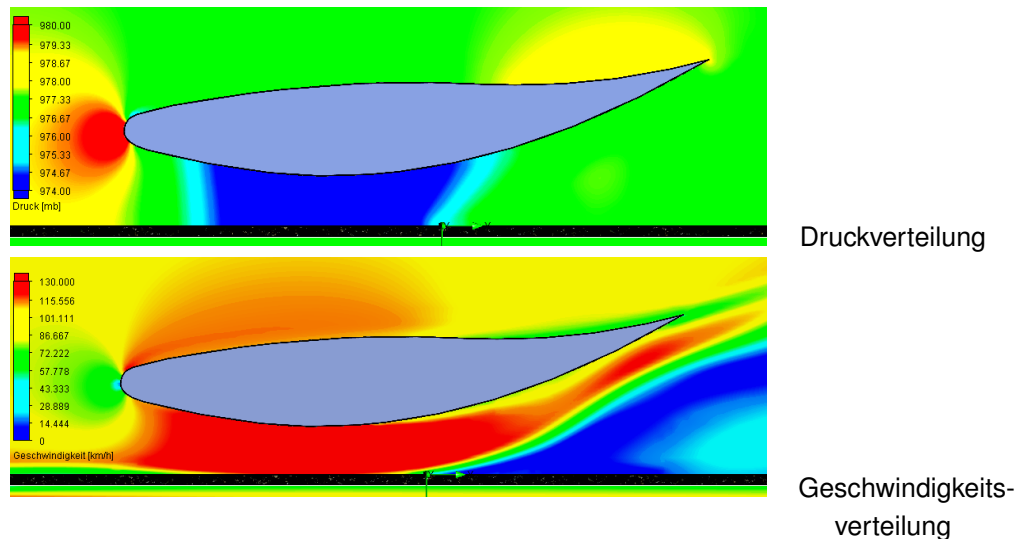


Abbildung 5.4: Bodeneffekt an einem Flügelprofil

## 5.2 Unterboden und Diffusor

Die richtige Einstellung des Unterbodens in Kombination mit dem Diffusor sorgt für einen hohen Abtrieb bei verhältnismäßig geringem Zuwachs des Widerstands [Huc05, S.530 ff.]. Dank des Diffusors lässt sich die aerodynamische Effizienz des Rennwagens deutlich steigern [Huc05, S.536]. Die Wirksamkeit des Diffusors ist sehr stark vom Bodenabstand, von der geometrischen Form und von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. In der Abbildung 5.5 ist die Abhängigkeit von der erzeugten Abtriebskraft zur Fahrgeschwindigkeit von Fahrzeugen verschiedenster Kategorien zu sehen. Man kann hierbei der Grafik entnehmen, dass Fahrzeuge, die antriebserzeugende Elemente im Konzept integriert haben mit Zunahme der Geschwindigkeit die Abtriebskraft exponentiell steigt.

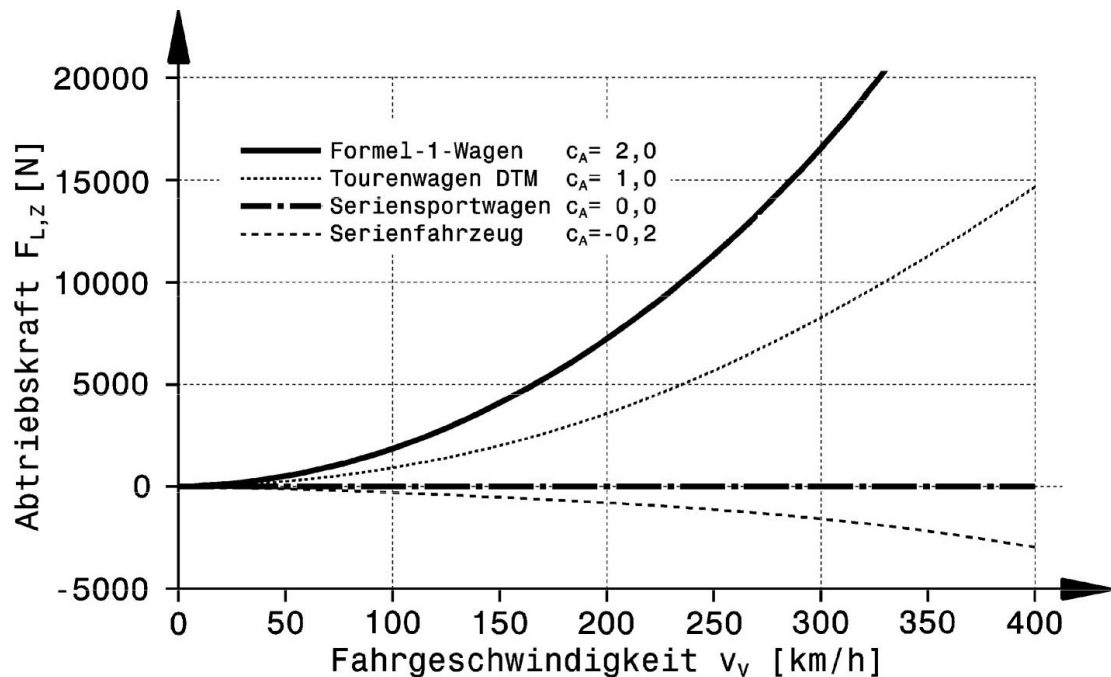


Abbildung 5.5: Errechneter Verlauf der Abtriebskraft über der Fahrgeschwindigkeit

Zu Vergleichszwecken wurden die Stirnflächen einheitlich mit  $2m^2$  angenommen.

Quelle: [Trz12, S.139]

Der Unterboden und der Diffusor, die in der Abbildung 5.6 dargestellt sind, sind nach den Vorgaben des Formula SAE Reglements und nach Richtwerten aus [Huc05] sowie aus [Trz12] erstellt worden. Man kann dieser Ausführung entnehmen, dass der Unterboden eine Verjüngung im vorderen Bereich erfahren hat. So wird durch Unterboden und Fahrbahn eine Kombination aus Venturi-Düse und Diffusor gebildet. Durch diese vorhandene Querschnittsverengung nimmt die Fließgeschwindigkeit der Luft deutlich zu, gleichzeitig nimmt auf Grund strömungsmechanischen Gesetzmäßigkeiten der statische Druck an dieser Stelle jedoch ab. Es entsteht ein höherer Druck vor der verjüngten Stelle und ein geringerer Druck hinter dieser Stelle. Diese Druckdifferenz ist somit ein direktes Maß für die Fließgeschwindigkeit und damit auch für den Massen- und Volumenstrom zwischen dem Unterboden und der Fahrbahn. Je größer die Durchflussgeschwindigkeit und damit auch die Druckabnahme im Bereich der Engstelle, desto größer ist die Druckdifferenz. Somit wird mit einer Zunahme des Druckdifferenzes das Auto kräftiger an den Boden gesaugt.

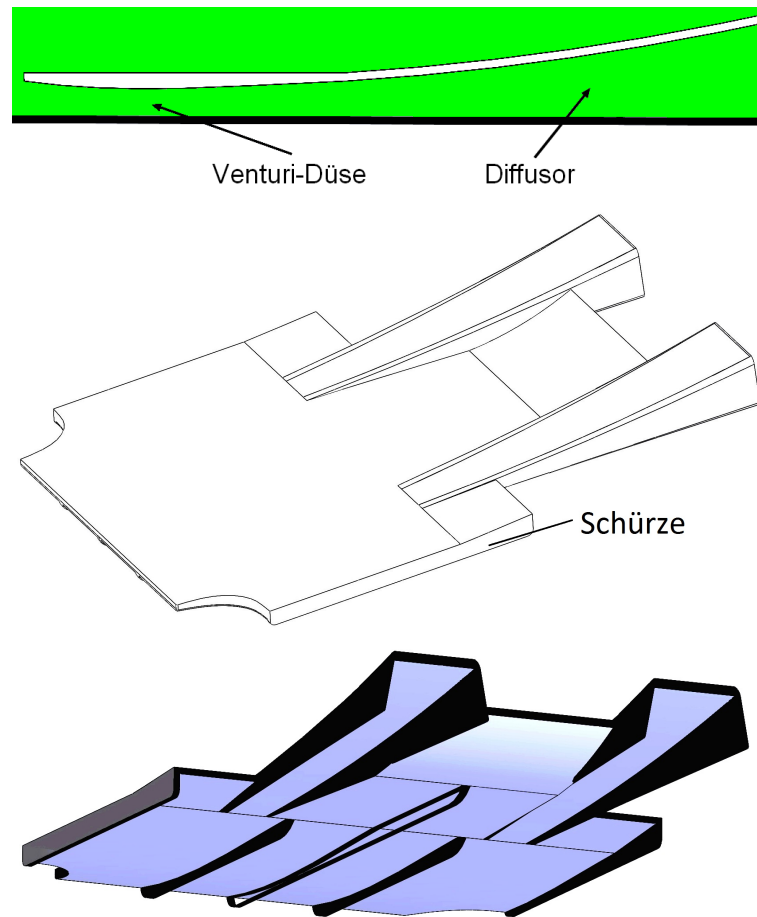


Abbildung 5.6: Unterboden und Diffusor sind eine Einheit

Das Nutzen des Venturieffekts bei Unterböden führt also zu Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und somit zur Erhöhung des Abtriebs des Fahrzeugs. Man kann erkennen, dass hierbei ein abgerundeter Übergang zwischen den Druckbereichen ausgewählt wurde, um Verwirbelungen an diesen Bereichen zu vermeiden. Verwirbelungen sorgen dafür, dass sich die Strömung von dem Unterboden ablöst, was wiederum zu einem Energieverlust führt. Verwirbelungen sorgen im Endeffekt also für einen höheren Fahrwiderstand, der nicht erwünscht ist. Daher wurden die Formen hierbei so konstruiert, sodass durchgängig ein glatter Übergang zwischen den Konturen herrscht.

Der Diffusor verzögert die Luft wieder ungefähr auf das Niveau von der Anströmgeschwindigkeit und der statische Druck steigt wieder an, weil sich der Querschnitt zum Heck hin vergrößert. Dieser Druckanstieg im Diffusor sorgt dafür, dass der Druck an seinem Einlass reduziert wird, was für eine Reduktion des Gesamtdruckes im Diffusor sorgt, was wiederum zu einem Anstieg des Abtriebs führt [Huc05, S.531 f.]. Zugleich sorgt dieser Druckanstieg am Diffusorende dafür, dass zwischen der Fahrbahn und dem Diffusor noch ein zusätzliches Unterdruckgebiet entsteht, was ebenfalls zu einem Abtrieb führt [Huc05, S.531 f.]. In der Abbildung 5.7 ist diese doppelte Wirkungsweise des Diffusors schematisch (oberes Bild) dargestellt und durch eine Simulation bestätigt wor-

den.

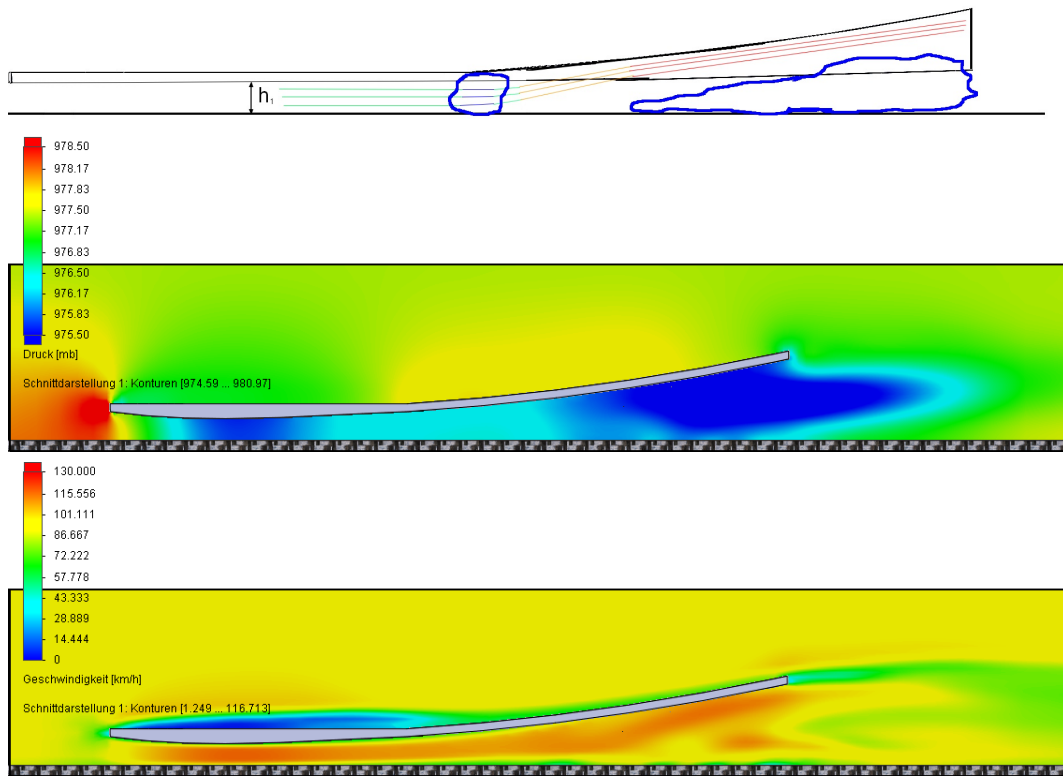


Abbildung 5.7: Drücke und Geschwindigkeiten am Diffusor

Die Simulation zeigt, dass sich an der Düse und im Bereich des Diffusors ein Unterdruck einstellt, der in der Abbildung (mittleres Bild) dunkel Blau abgebildet ist. Um besser zu verstehen, dass der Druck direkt von der Geschwindigkeit, die dort fließt, abhängt, wurde das untere Bild mit eingefügt.

Die Druckabsenkung nach der Verjüngung hängt maßgeblich vom Verhältnis der Querschnitte von Diffusorende zur Düse ab [Huc05, S.527]. Das optimale Verhältnis ist jedoch von vielen Faktoren abhängig. Daher kann die Konstruktion des Diffusors erst dann sinnvoll beginnen, wenn das Fahrzeug sich im Endstadium der Konstruktion befindet.

Bei der Konstruktion des Diffusors ist meist der Bodenabstand  $h_1$  schon durch das Reglement begrenzt, somit quasi fast vorgegeben. Bei der Formula Student ist ein nutzbarer Federweg von mindestens 50,8 mm vorgeschrieben, d.h., dass der Bodenabstand nicht kleiner als diese 50,8 mm werden darf. Meist landet man bei 60 bis 80 mm um eine Sicherheit zu haben, da die Fahrbahnen meist Unebenheiten aufweisen. Die Wahl der Diffusorlänge  $N$  ist von dem vorhandenen Raum, der gefahrenen Geschwindigkeit sowie vom gewünschten Abtrieb abhängig. Je Länger der Diffusor ist, desto größer kann der Abtrieb werden.

In der Abbildung 5.8 ist der für die Strömungsuntersuchungen konstruierte Diffusor zu erkennen. Hierbei legt die Diffusorlänge  $\frac{N}{h_1}$  fest mit welchem Maß der Strömungsquerschnitt zunimmt. Das effektive Flächenverhältnis  $A_R = \frac{h_2}{h_1}$  legt die obere Grenze der

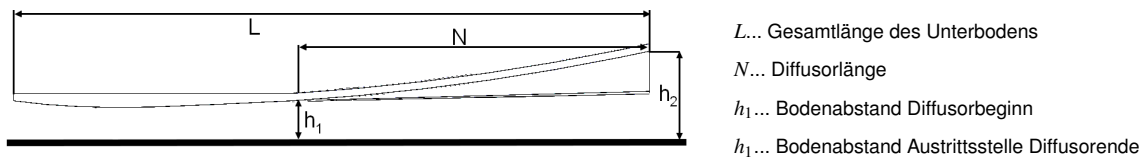


Abbildung 5.8: Wichtige Größen eines Diffusors

Druckrückgewinnung in Strömungen fest [Huc05, S.531], d.h., dass ein großer  $A_R$  einen großen Abtrieb zur Folge hat. Wenn die Strömung im Diffusor jedoch abreist dann wird das effektive Flächenverhältnis der Strömung kleiner als das geometrische. Somit wird die Verzögerung der Strömung und der Druckanstieg gemindert. Es kann somit lediglich nur ein geringerer Abtrieb erzeugt werden.

Die Wirkung des Venturieffekts wird durch den Einsatz von schürzen verstärkt [Huc05, S.528]. Ein Ansatz einer Schürze kann man der Konstruktion des Unterbodens in Abbildung 5.6 sehen. Diese Schürze soll ein seitliches Einströmen von Luft mindern, um Verwirbelungen im Unterbodenbereich in Grenzen zu halten. Dieser ist deshalb sehr kurz gestaltet, da das Reglement des Formula Student einen Bodenkontakt jeglicher Komponenten des Wagens verbietet.

## 5.3 Flügel

Ein Flügel wird im Rennsport ebenfalls eingesetzt um Abtrieb zu erzeugen. Die Begriffe und die Größen, die mit einem Flügelprofil zusammenhängen, sind in der Abbildung 5.9 zu sehen. So ein Flügelprofil gibt es in verschiedener Ausführungen. Die eingesetzten Profile werden der Einsatzgeschwindigkeit angepasst, um den optimalen Abtrieb und den möglichst geringsten Widerstand zu erreichen. Hierbei gibt es den Unterschied zwischen einem symmetrischen und einem gewölbten Profil, wie in Abbildung 5.10 zu sehen.

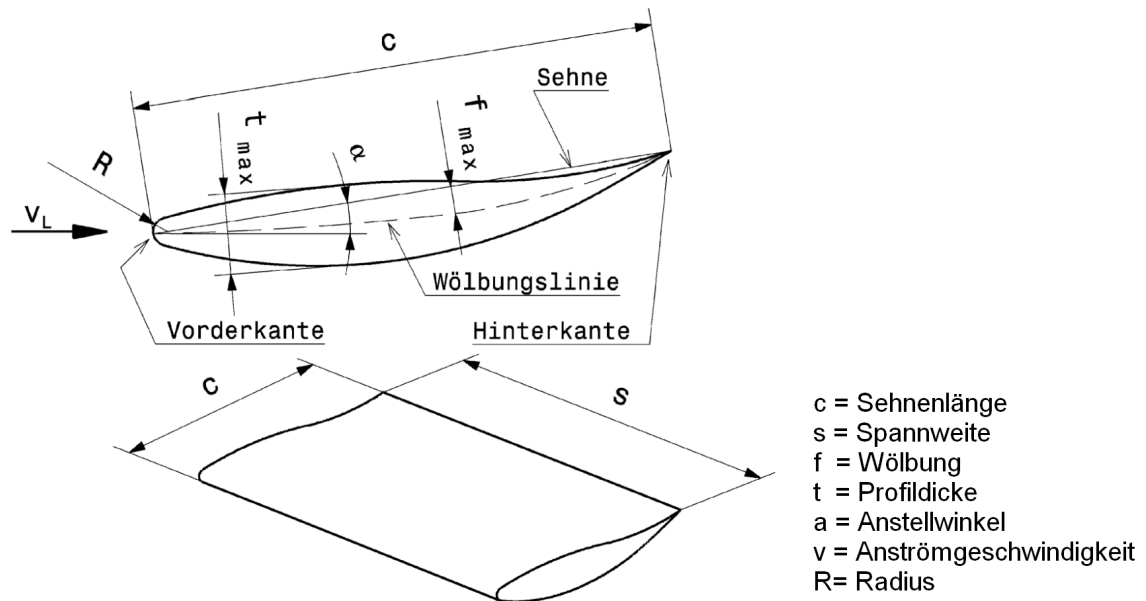


Abbildung 5.9: Begriffe und Größen eines Flügels

Quelle: [Trz12, S. 143]

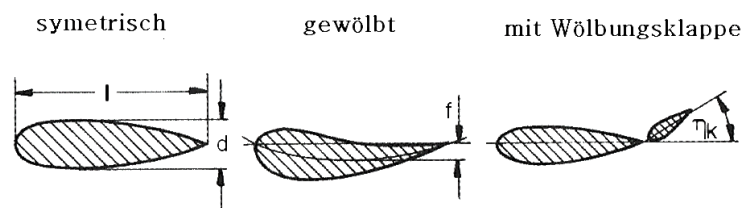


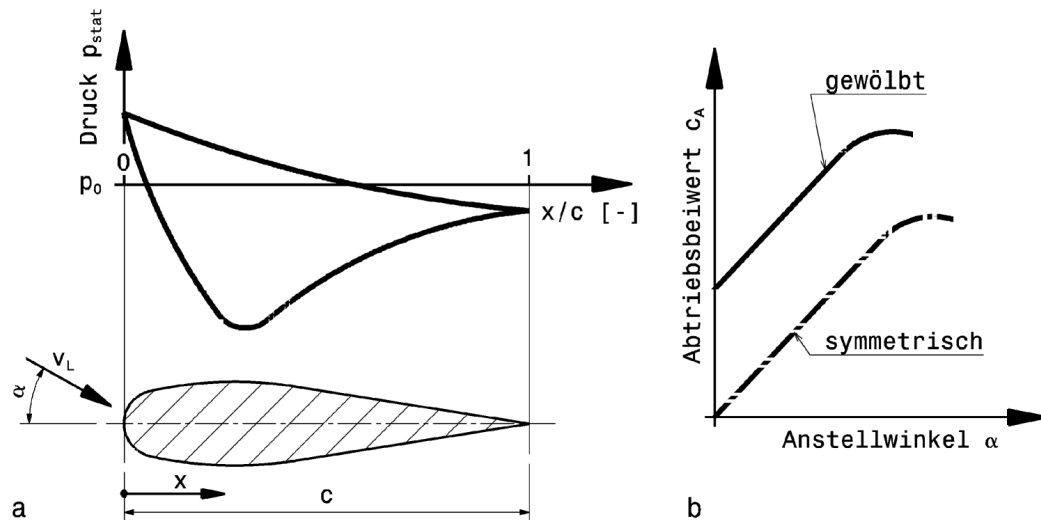
Abbildung 5.10: Profilararten

Quelle: [Huc05]

In der Abbildung 5.11a ist der Druckverlauf eines symmetrischen Profils, bezogen auf seine Länge dargestellt, wenn das Profil mit einem Medium umströmt wird. Dieser Druckverlauf entsteht bei einem Anstellwinkel<sup>11</sup>  $\alpha > 0^\circ$ . Der Einstellwinkel<sup>12</sup> eines einteiligen Flügels sollte bei max.  $14^\circ$  bis  $16^\circ$  liegen, während der Anstellwinkel einer Wölbungsclappe max.  $30^\circ$  betragen sollte [Trz12, Huc05].

<sup>11</sup> Der Anstellwinkel ist der Winkel zwischen Profilsehne und der anströmenden Luft. Es wird von einem Anstellwinkel gesprochen, wenn es sich um Wölbungsclappen handelt, die justierbar sind.

<sup>12</sup> Der Einstellwinkel ist der Winkel zwischen Profilsehne und Längsachse des Fahrzeugs. Er ist durch die Konstruktion des Fahrzeugs festgelegt und kann nicht verändert werden. Bei einem Einstellwinkel redet man, wenn man über das Flügelprofil spricht.



- a) Druckverlauf eines symmetrischen Profils bei einem Anstellwinkel  $\alpha$ .  
b) Vergleich symmetrisches Profil mit gewölbtem Profil in Abhängigkeit vom Anstellwinkel.

Abbildung 5.11: Vergleich symmetrischer und gewölbter Profile

Quelle: [Trz12, S.145]

Mann kann in der Abbildung 5.11 a erkennen, dass der Druck eines Profils, bei einer Anströmung unter dem Winkel  $\alpha$ , zunächst an der Front durch den gestauten Druck steigt und an der Unterseite bis zur maximalen Wölbung abnimmt. Zur Hinterkante steigt der Druck wieder an. Der Druck oberhalb des Profils senkt sich bis auf das Niveau der Hinterkante kontinuierlich ab. So entsteht eine Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterseite eines Profils, welche zu dem gewünschten Abtrieb führt. Nach der Abbildung 5.11b ist deutlich ersichtlich, dass ein gewölbtes Profil, bei verschiedenen Anstellwinkeln gemessen, mehr Abtrieb erzeugt als das symmetrische. Dies liegt daran, dass der Weg, der durch das Medium zurückgelegt werden muss, auf der gewölbten Seite länger ist, und somit muss dort die Geschwindigkeit des Mediums auch höher sein, damit das Kontinuitätsgesetz erhalten bleibt. Dies führt wiederum dazu, dass ein gewölbtes Profil einen höheren Druckdifferenz, zwischen oberer und unterer Profilstelle erzeugt.

Um den Abtrieb im Rennwagenbereich zu erzeugen werden also einerseits Profile um einen Winkel  $\alpha$  angestellt, andererseits gewölbte Profile genutzt. Meist werden jedoch diese beiden Maßnahmen kombiniert. Um zu beweisen, dass gewölbte Profile mehr Abtrieb erzeugen als symmetrische Profile, wurden die Messungen, die in der Abbildung 5.12 zu sehen sind, durchgeführt. Bei dieser Messung wurden vier verschiedene Profile, zwei gewölbte, sowie zwei symmetrische, die in der Abbildung 5.12 rechts zu sehen sind, untersucht. Dabei ging es um den erzeugten Abtrieb der einzelnen Profile in Abhängigkeit des Anstellwinkels. Dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass die beiden gewölbten Profile, mit den Bezeichnungen *S1223* und *FX74-CL5-140*, einen dauerhaft höheren Abtrieb als die symmetrischen Profile *Referenz* und *FX63-137* bei gleichem



Anstellwinkel erzeugen.

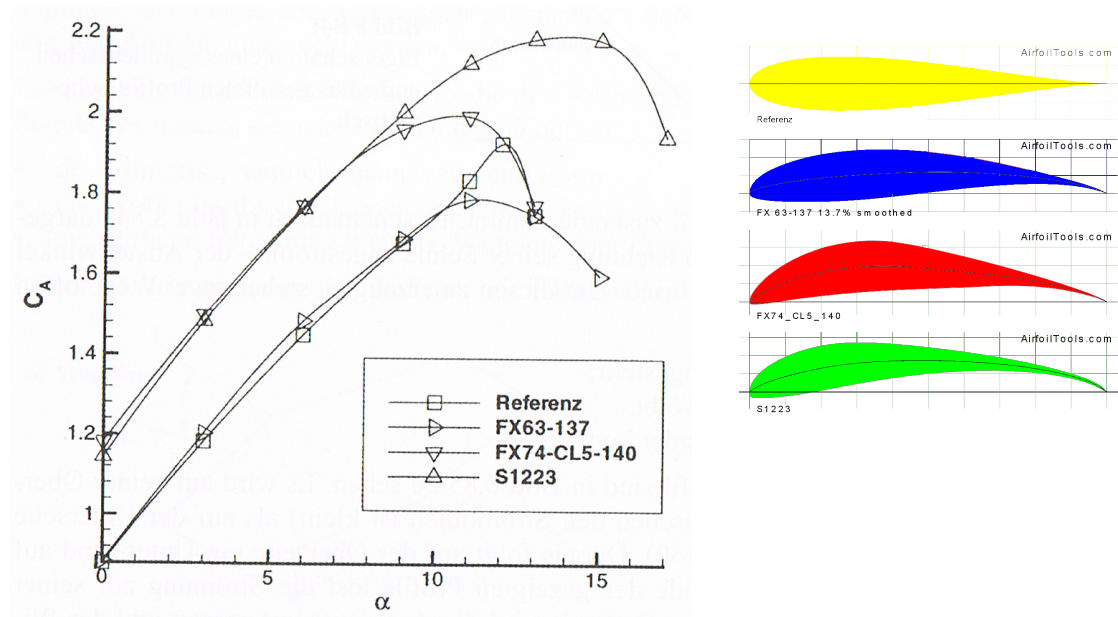
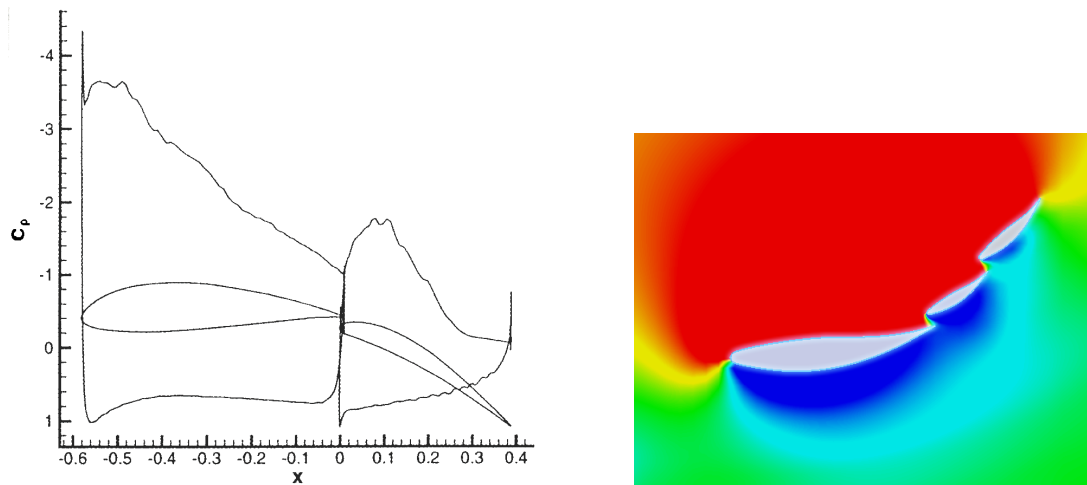


Abbildung 5.12: Auftrieb in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Quelle: [Huc05, Air13]

Um diesen Abtrieb zu verstärken, werden den Profilen Wölbungsclappen hinzugefügt. Die Flügelprofile und die Wölbungsclappen ordnet man so an, dass ein kleiner Spalt zwischen dem Profil und der Nase der Klappe entsteht. Diese Profile bilden wiederum eine Düse, wodurch die Strömung dort an Geschwindigkeit zunimmt. Diese Anordnung soll dafür sorgen, dass die Strömung am ende des Flügelprofils nicht abreist, sondern an der Wölbungsclappe weiter Strömt [Huc05, S. 516 f.]. Diese Maßnahme sorgt für einen erhöhten Abtrieb, wie man es der Abbildung 5.13 entnehmen kann.



Profil mit einer Wölbungsclappe [Huc05, S. 517] Heckflügel mit zwei Wölbungsclappen

Abbildung 5.13: Druckverteilung an Profilen mit Wölbungsclappen

Dort ist die Druckverteilung  $c_p = f(\frac{x}{l})$  zu erkennen. Mann erkennt, dass ab dem Punkt  $x = 0$ , an dem die Strömung bei der Wölbungsclappe angekommen ist, der  $c_p$ -Wert<sup>13</sup> wieder ansteigt. Dieses weist darauf hin, dass ab dort der Abtrieb zunimmt. Um den Druckverlauf besser darzustellen, wurde der Heckflügel mit zwei Wölbungsclappen simuliert. Man kann sehr gut den Verlauf der Strömung im Unterdruckbereich (blau) sehen. Hierbei erkennt man, dass die Strömung am ende des Flügelprofils nicht abreist, sondern an der ersten Wölbungsclappe weiter entlang strömt. Am hinteren Bereich der zweiten Wölbungsclappe reist jedoch die Strömung ab. Wenn die Strömung am dritten Profil weiter entlang strömen soll, müsste die Geschwindigkeit erhöht werden. Bei dieser Simulation betrug die Anströmung 90 km/h.

In der Abbildung 5.14 ist der  $c_A$ -Wert und der  $c_W$ -Wert in Abhängigkeit des Anstellwinkels dargestellt. Dieser kann man entnehmen, dass der Abtriebsbeiwert, bis zum einem Anstellwinkel der Wölbungsclappe von  $30^\circ$ , zunimmt. Bei größeren Anstellwinkeln steigt der Abtrieb nicht mehr an, sondern sinkt. Der ungewollte Widerstand steigt hingegen mit dem Winkelanstieg an.

<sup>13</sup> Der  $c_p$ -Wert ist der Leistungsbeiwert und gibt an, wie viel Strömungsenergie in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann [Haf06, S.49f].

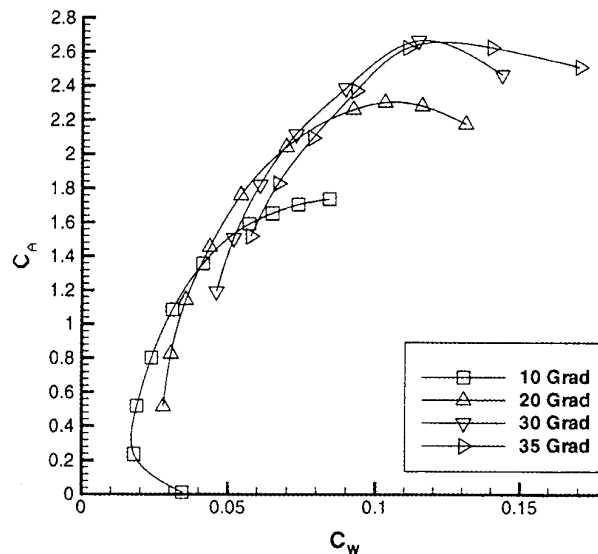


Abbildung 5.14: Abtriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Wölbungsclappen

Quelle: [Huc05, S.517]

Will man die Leistungsfähigkeit eines Flügels steigern, dann kann man mehrere Flügel kobilieren [Huc05, S. 518 f.]. Ein Beispiel, wie mehrere Flügel an einem Heckflügel aussehen können, ist in der Abbildung 5.15 zu sehen. Da in der Arbeit lediglich bewiesen werden soll, ob aerodynamische Anbauten, die bei den Geschwindigkeiten, die in der Formula Student Klasse gefahren werden, sich überhaupt lohnen, wird die Möglichkeit der Anordnung mehrerer Flügel lediglich erwähnt, aber nicht näher untersucht.

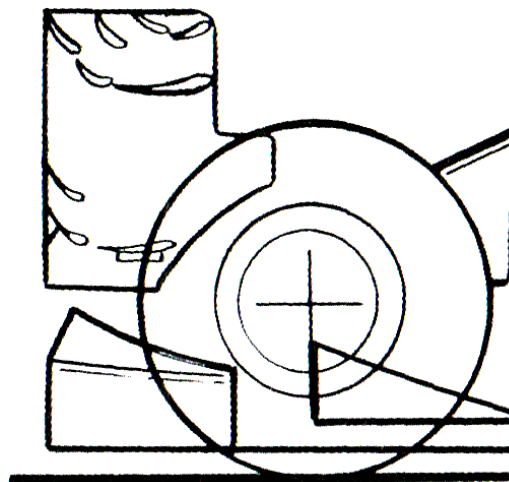


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung eines Heckflügels der Formula 1 mit mehreren Flügeln

Quelle: [Huc05, S.520]

Optimierungen an einem Flügel können vorgenommen werden, indem der Anstellwinkel und die Abstände der Profile zueinander näher untersucht werden [Huc05, S.518]

ff.]. Aus Zeitgründen wird dies in dieser Arbeit nicht genau untersucht werden, da die Simulationen, mit dem zur Verfügung stehenden Mitteln, in dieser kurzen Zeit, nicht mit der erforderlichen Genauigkeit ausgeführt werden kann.

Mann muss sich bei den ganzen Betrachtungen dabei im Klaren sein, dass was rechnerisch an Abtrieb möglich ist, in der Realität nie möglich sein wird. Faktoren, wie Strömungsablösung, Druckausgleich, Oberflächenrauheit und die ungleichmäßige Anströmung der Flügelemente mindern den Abtrieb. Um diese Einflüsse zu verringern, bedarf es an vielen Strömungsversuchen und Simulationen. Dabei wird z.B. versucht eine gleichmäßige Anströmung zu erzeugen, indem man Bauteile, wie Karosserie, Räder oder das Abgasrohr, so auslegt und platziert, dass sie die Anströmung eines Flügels so wenig wie möglich negativ beeinflussen [Huc05, S.519]. Ein wichtiger Faktor, den man als Ingenieur bei der Flügelauslegung beachten muss, ist dass durch die entstandene Druckdifferenz das Medium an den Seiten vom Überdruckgebiet in das Unterdruckgebiet strömen will. Um dies so weit wie möglich zu verhindern empfiehlt Hucho (2005), Endplatten an den Seiten der Flügel anzubringen. Laut Trzesniowski (2012) bringt eine Endplatte, wie in der Abbildung 4.3 zu sehen, 30% mehr Abtrieb. Diese sollen den Druckausgleich an den Seiten verringern und Seitenwinde, die zur Strömungsablösung führen können, abbremsen.

Eine Strömungsabriss bzw. Strömungsablösung an einem Profil entsteht dadurch, dass der Einstellwinkel und/oder der Anstellwinkel zu groß ist oder dadurch, dass Seitenwinde die Strömung beeinflussen. Dieser kritische Einstellwinkel liegt bei ca. 14 bis 16° [Trz12, S.145], der beim Anstellwinkel bei max. 30° [Huc05, S.516]. Werden die Winkel größer, als die eben genannten, dann kann die Strömung der Kontur des Flügels nicht mehr folgen, weil die Wölbung zu groß für die Strömung geworden ist. Der Luftstrom fließt nun nicht mehr gleichmäßig über die Flügeloberfläche. Es entsteht ein Strömungsabriss und die Strömung beginnt sich zu verwirbeln. Diese Verwirbelung sorgt dafür, dass nicht mehr so ein großer Unterdruck erzeugt werden kann, denn die Fläche der unteren Profilseite kann nicht mehr vollständig genutzt werden, um den Unterdruck zu erzeugen. Durch diese Verwirbelungen entsteht nicht nur ein Abtriebsverlust, sondern auch ein zusätzlicher Widerstand, der als induzierten Widerstand bezeichnet wird. Dieser wird auch durch die Ausgleichsströmungen verursacht, die den entstandenen Druckdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite des Profils auszugleichen versuchen.

Auch die Lage der Flügel spielt eine wichtige Rolle. Sie ist sehr wichtig für die Wirksamkeit. Man sollte sie möglichst hoch und weit in den Heckbereich des Fahrzeugs platzieren [Huc05, S. 518 ff.]. Dies sollte einerseits geschehen, weil die anderen Komponenten die Anströmung beeinflussen können, und somit die Effektivität der Flügel gemindert wird. Andererseits, wirkt ein Druckpunkt<sup>14</sup>, der hinter dem Schwerpunkt des Rennwagens

<sup>14</sup> Der Druckpunkt ist nicht dem Schwerpunkt gleichzusetzen, er ist der Punkt am Fahrzeug, durch den theoretisch die Wirkungslinien aller aerodynamischen Kräfte verlaufen.

liegt, stabilisierend [Trz12, S.180 ff.]. Das Handling für den Fahrer ist so besser. Bei äußeren Einflüssen, wie starkem Seitenwind, kann somit einem Untersteuern<sup>15</sup> entgegengewirkt werden [Trz12, S.180 ff.]. Andererseits, wird die Abtriebskraft effektiver auf die Straße gebracht, wenn der Druckpunkt der Flügel genau über der Achse liegt. Denn je weiter weg der Druckpunkt liegt, desto weniger Kraft kann auf die Achse übertragen werden. Die folgende Berechnung und die Abbildung 5.16 sollen dies Verständlich machen. Aus der Gleichung 5.1 ist ersichtlich, dass die aus den Momenten hervorgerufenen Kräfte sehr klein sind, da die Verhältnisse  $\frac{l_f}{L_a}$  und  $\frac{l_f}{L_a}$  relativ klein sind. Daher kann man darauf schließen, dass es wichtiger ist, die Flügel so zu platzieren, dass sie sauber an geströmt werden und dass der Druckpunkt somit hinter dem Schwerpunkt landet, als dass die resultierenden Momente betrachtet werden [Trz12, S.145].

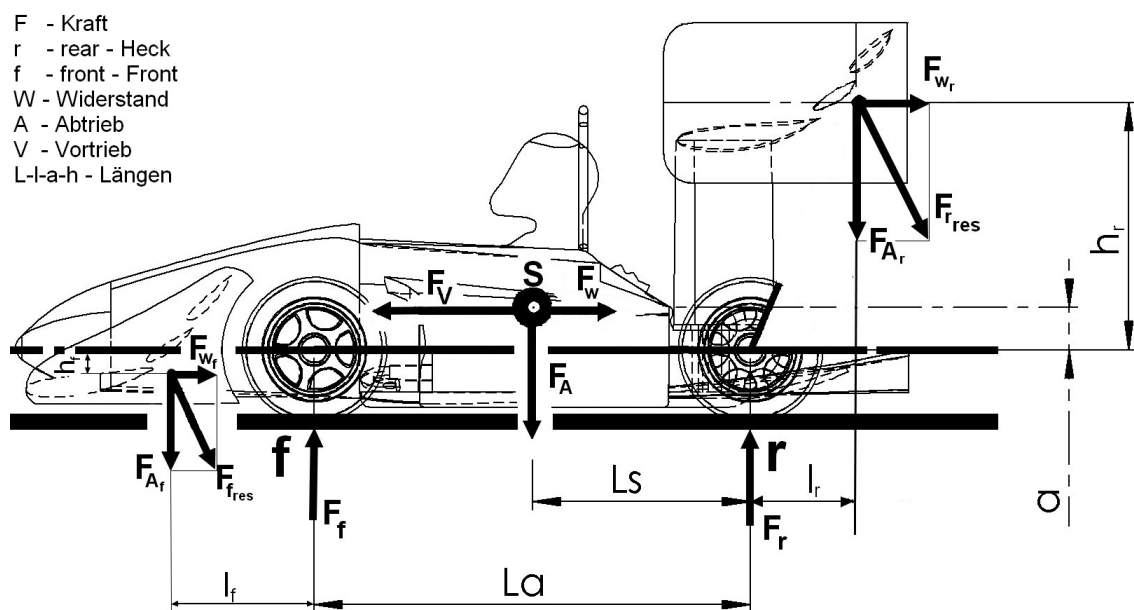


Abbildung 5.16: Entstehende Momente durch die Lage der Flügel

<sup>15</sup> Von Untersteuern wird dann gesprochen, wenn das Fahrzeug bei Kurvenfahrten über die Vorderachse schiebt da die Haftreibung der Räder fehlt. Die Hinterräder behalten dabei die Haftreibung. Konsequenz ist, dass der optimale Radius nicht gefahren werden kann. Von Übersteuern spricht man, wenn die Hinterräder die Haftreibung verlieren und das Heck ausbricht.

$$\begin{aligned}
 \sum F_y \quad 0 &= F_{A_f} + F_{A_r} - F_f - F_r \\
 F_r &= F_{A_f} + F_{A_r} - F_f \\
 \\
 \sum M_{(f)} = 0 &= F_{A_f} \cdot l_f - F_{A_r} \cdot (l_r + L_a) + F_r \cdot L_a \\
 0 &= F_{A_f} \cdot l_f - F_{A_r} \cdot (l_r + L_a) + F_f \cdot L_a - F_{A_f} \cdot L_a - F_{A_r} \cdot L_a \\
 0 &= F_{A_f} \cdot (l_f - L_a) - F_{A_r} \cdot (l_r + 2L_a) + F_f \cdot L_a \\
 F_f &= \frac{F_{A_r} \cdot (l_r + 2L_a) - F_{A_f} \cdot (l_f - L_a)}{L_a} \\
 F_f &= \frac{F_{A_r} \cdot (l_r + 2L_a) + F_{A_f} \cdot (L_a - l_f)}{L_a} \\
 F_f &= F_{A_r} \cdot \left(2 + \frac{l_r}{L_a}\right) + F_{A_f} \cdot \left(1 - \frac{l_f}{L_a}\right)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
 \sum F_y \quad 0 &= F_{A_f} + F_{A_r} - F_f - F_r \\
 F_f &= F_{A_f} + F_{A_r} - F_r \\
 \\
 \sum M_{(r)} \quad 0 &= F_{A_f} \cdot (l_f + L_a) - F_f \cdot L_a - F_{A_r} \cdot l_r \\
 0 &= F_{A_f} \cdot (l_f + L_a) - F_{A_r} \cdot l_r - F_r \cdot L_a + F_{A_f} \cdot L_a + F_{A_r} \cdot L_a \\
 0 &= F_{A_f} \cdot (l_f + 2L_a) + F_{A_r} \cdot (L_a - l_r) - F_r \cdot L_a \\
 F_r &= \frac{F_{A_f} \cdot (l_f + 2L_a) + F_{A_r} \cdot (L_a - l_r)}{L_a} \\
 F_r &= F_{A_f} \cdot \left(2 + \frac{l_f}{L_a}\right) + F_{A_r} \cdot \left(1 - \frac{l_r}{L_a}\right)
 \end{aligned}$$

Alle die hier aufgeführten Informationen, beziehen sich auf die einzelnen Komponenten, die ideal angeströmt werden. Um die Optimierung des Gesamtsystems durchzuführen, benötigt man einen Windkanal und die Numerik (Strömungssimulationen), da die Komponenten sich gegenseitig in der Anströmung beeinflussen.

### 5.3.1 Frontflügel

Der Frontflügel, wie er für die Untersuchungen ausgelegt wurde, ist in der Abbildung 5.17 zu sehen. Er besteht aus einem gewölbten Profil und zwei Wölbungsklappen, sowie einer Endplatte an jeder Seite. Die Breite des Frontflügels ist vom Reglement auf die Gesamtbreite des Fahrzeugs einschließlich der Räder begrenzt und beträgt 1410 mm, die Länge 800 mm und Höhe 483 mm. Der Abstand zwischen dem hinteren Bereich des

Profils und dem Kopf der Wölbungsklappe ist frei gewählt und beträgt 20 mm. Zukünftig müsste der Abstand durch mehrere Berechnungsläufe mit dem Originalmodell optimiert und dann festgelegt werden.

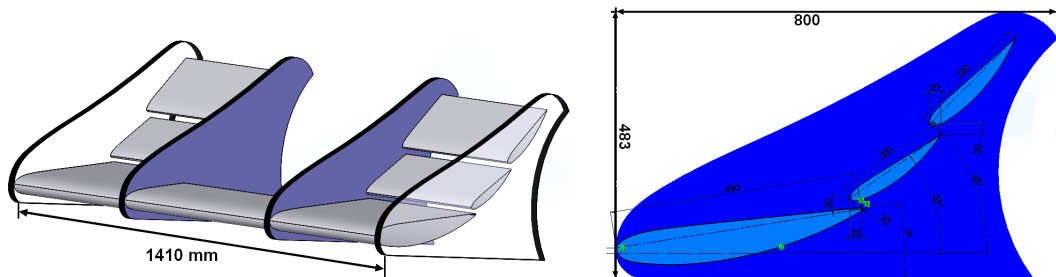


Abbildung 5.17: Frontflügel- und Profilbemaßung

Der Frontflügel ist für die Untersuchungen mit zwei Wölbungsklappen ausgestattet, da ein großer Abtrieb erzeugt werden soll. Zwei Wölbungsklappen erzeugen theoretisch mehr Abtrieb als eine einzelne. Um aber das Optimum zwischen Widerstand und Abtrieb zu finden müssten weitere Untersuchungen vorgenommen werden, da die Wirkung der Einstellwinkel und Anstellwinkel nicht näher untersucht wurden. Die Winkeleinstellungen resultierten vorerst aus den Beobachtungen der Konkurrenzfahrzeuge.

### 5.3.2 Heckflügel

Der Heckflügel ist in der Abbildung 5.18 zu sehen und ist mit einem gewölbten Profil und zwei Wölbungsklappen ausgestattet. Die Frontflügel und die Heckflügelprofile sind bewusst so gewählt, dass im Heckbereich die Profile eingesetzt werden, die einen stärkeren Abtrieb erzeugen als die Profile an dem Frontflügel, die hier nicht so stark gewölbt sind. Der Druckpunkt sollte, wie oben besprochen, hinter dem Schwerpunkt sein. Da bei der Fahrt der Frontflügel, meist bessere Strömungsbedingungen vorfindet, als der Heckflügel, steigen die Abtriebskräfte unterschiedlich stark an. Der Abtrieb am Frontflügel steigt schneller an, weil er zu der besseren Anströmung noch den Bodeneffekt nutzt. Die Höhe in dem der Heckflügel angebaut ist, beträgt 980 mm, damit es in der Anströmung weitestgehend nicht beeinflusst wird. Weitere Maße sind der Abbildung 5.18 zu entnehmen.

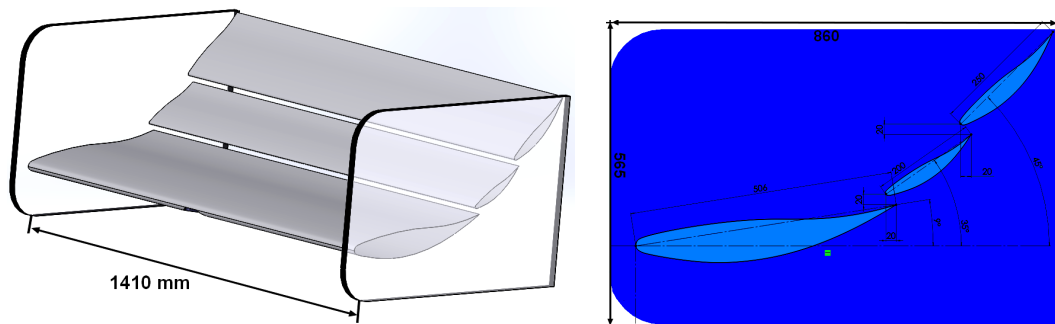


Abbildung 5.18: Heckflügel- und Profilbemaßung

Die Anbindung des Heckflügels am Rennwagen erfolgt hierbei über eine Säule, die eine Flügelform besitzt. Dieses ist bei dem Modell mit der Vollausrüstung in der Abbildung 5.19 zu sehen. Sie ist daraus resultiert, da die Anbindung nicht über die normalen 25,4 mm Rohren möglich war. Das Problem liegt lediglich an dem 3D-Drucker, der zwar die dünnen Rohre Drucken kann, die aber bei der Endformung des gedruckten Fahrzeugs leicht abbrechen würden. Daher resultiert die Säule, die jedoch auf Grund ihrer Form die Ergebnisse nicht stark beeinflussen sollte. Natürlich sollten auch die Anstellwinkel der Wölbungsclappen verstellbar sein, weil aber die Wandstärken im 1:15 Modell sehr dünn werden und diese sehr zerbrechlich sind, wurde keine Möglichkeit gesehen die Verstellbarkeit zu realisieren.

Es wurden bei der Konstruktion lediglich Maßnahmen ergriffen, die das vorhandene Fahrzeug des TMM ermöglichte. Bei einer Neukonstruktion eines zukünftigen Rennwagens könnte man sicherlich weitere aerodynamische Aspekte betrachten. Bei weitergehenden Untersuchungen könnte man dann Optimierungsmaßnahmen vornehmen und die Empfehlungen von Trzesniowski (2012) näher berücksichtigen. Er empfiehlt folgende Parameter, nach dem man sich bei Rennfahrzeugen richten kann, sobald das Reglement es erlauben sollte:

- das Seitenverhältnis  $\frac{s}{c}$  eines Rechteckprofils sollte 5 bis 8 sein.
- der maximale Einstellwinkel sollte bei 14 bis 16° liegen.
- Profildicke  $t$  bis maximal  $0,12 \cdot c$  für großen Abtrieb.
- leichte Wölbung  $f$  an der Stelle  $0,3 \cdot c$  für geringen Abtrieb.
- große Wölbung von  $f = 0,05 \cdot c$  bis  $f = 0,15 \cdot c$  an den Stellen  $0,5 \cdot c$  bis  $0,6 \cdot c$  für höheren Abtrieb.
- Radius der Nase ca.  $R = 0,01 \cdot c$  bis  $R = 0,03 \cdot c$ .
- Eine Endplatte sollte mindestens  $3 \cdot t$  nach unten überstehen. Zum Heck hin, sollte der Überstand größer sein als oben.



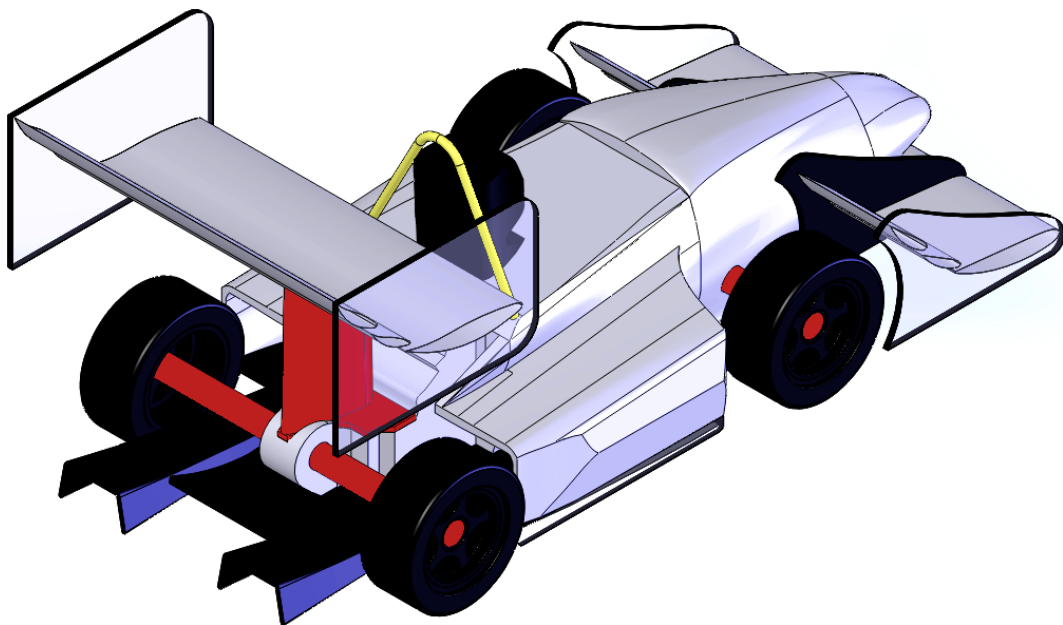


Abbildung 5.19: Fahrzeug mit der Vollausrüstung

## 6 Herstellung des 3D-Modells

Die Herstellung der Modelle erfolgte durch das Rapid-Prototyping (RP) Verfahren mittels der FDM-Technologie<sup>16</sup>, damit anschließend diese Modelle<sup>17</sup> strömungstechnisch im Strömungskanal untersucht werden können. Bevor die eigentliche Herstellung durch den 3D-Drucker erfolgen konnte, musste jedoch das Modelle durch eine Software (Catalyst) aufbereitet werden.

### 6.1 Catalyst

Catalyst ist die verwendete Software, mit der die Daten für das eigentliche Drucken vorbereitet werden. Die Software ist so konzipiert, dass der Anwender lediglich die STL-Datei<sup>18</sup> in die Software einlesen, eine geeignete Baulage des Modells wählen und die gewünschte Qualitätsstufe einlesen muss. Um Arbeitsschritte wie das Berechnen des Steuerprogramms und der Verfahrswege kümmert sich die Software.

Probleme oder Fehlermeldungen beim Einlesen der STL-Dateien ergeben sich häufig bei Lücken in der Oberfläche, Überschneidung von Flächen, Überlappung paralleler Flächen und bei mehreren Bauteilen in einer Datei [Alp05]. Die häufigsten Probleme ergeben sich beim einlesen von CAD-Modellen, die mit Flächen modelliert worden sind. Bei Modellen, die mit Volumenkörper modelliert sind, gibt es keine Probleme. In [Alp05] wird empfohlen, soweit es geht Flächenmodelle zu vermeiden. Es muss also bei der Konstruktion der Rennwagen-Modelle darauf geachtet werden, dass keine Flächenmodellierungen vorgenommen werden. Der TMM Rennwagen von der Saison 2013 und zwei weitere Modelle wurden soweit konstruktiv aufbereitet, dass maßstabgetreue Modelle davon durch den 3D-Drucker gedruckt werden konnte. Problematisch war dabei, dass viele Teile ursprünglich durch Flächen modelliert worden sind. Diese Teile mussten alle neu konstruiert werden, um daraus eine Baugruppe aus Volumenkörpern zu erstellen, welche dann vom Catalyst ohne Fehlermeldung modelliert wurde. In der Abbildung 6.1 kann man das Fahrzeug sehen, wie es fertig modelliert aussieht.

<sup>16</sup> FDM® bedeutet Fused Deposition Modeling und beschreibt die Technologie einer Bewerten Baureihe von Rapid-Prototyping-Anlagen zur vollautomatischen Umsetzung von 3D-CAD-Daten in funktionsfähige Prototypen aus unterschiedlichen Materialien [Alp13].

<sup>17</sup> Die fertigen Modelle sind in A zu sehen.

<sup>18</sup> Eine STL-Datei (Surface Triangulation Language) dient hauptsächlich der Bereitstellung geometrischer Informationen aus 3D-Modellen für die Fertigung z.B. mittels Rapid-Prototyping-Anlagen. Dabei wird im STL-Format die Oberfläche der Teile durch Dreiecke beschrieben bzw. angenähert.

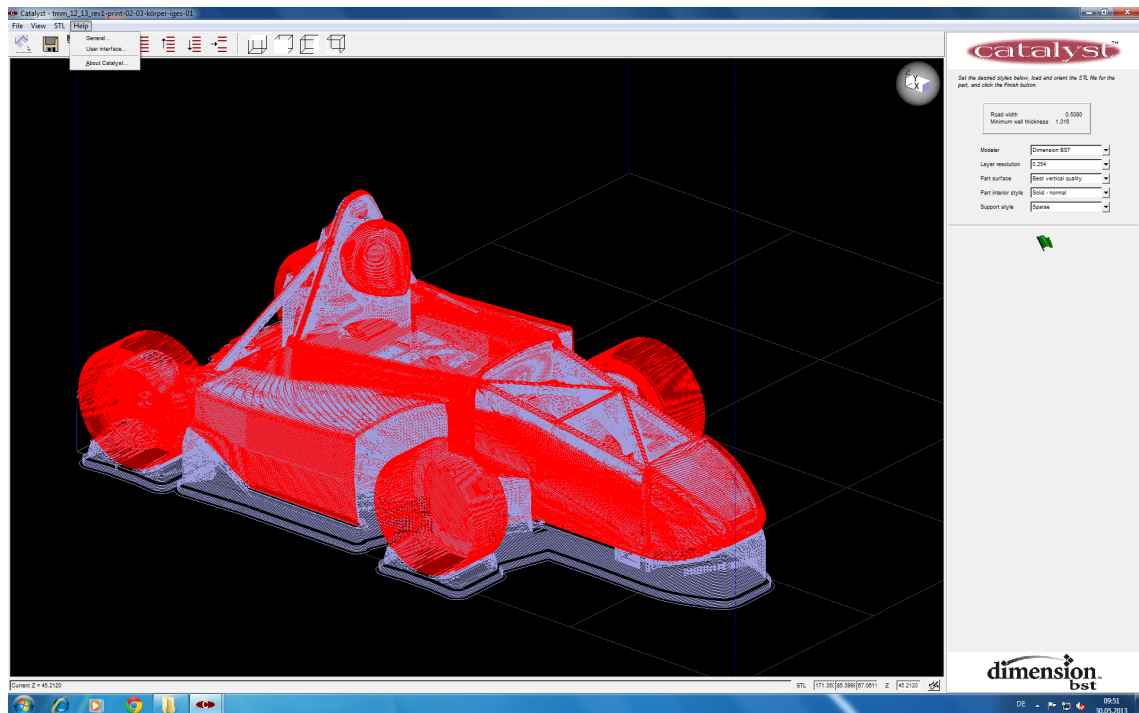


Abbildung 6.1: Modellierung durch Catalyst

## 6.2 Funktionsprinzip des verwendeten 3D-Druckers

Eine RP-Maschine (3D-Drucker) wie in der Abbildung 6.2 zu sehen, ist seit einigen Jahren in der Hochschule Mittweida vorhanden. Auf diesem 3D-Drucker werden Schicht für Schicht Modelle aus dem Material PC/ABS<sup>19</sup> mit der Dichte von  $1070 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  aufgebaut. Angetrieben vom Motor wird das Modellmaterial, welches in Drahtform auf nachladbaren Spulen vorliegt, durch den FDM-Maschinenkopf geführt und dort aufgeschmolzen. Anschließend wird das geschmolzene Material durch eine feine Düse auf die Bauplattform aufgebracht. Das geschmolzene Material verfestigt sich schnell und es entsteht eine Verbindung durch thermisches Verschmelzen. Es wird zunächst bei allen Modellen ein sogenanntes Stützmaterial auf die Bauplattform über eine zweite Düse aufgetragen, welche dazu dient, überhängende Bauteile abzustützen und zu fixieren. Dieses Stützmaterial unterscheidet sich durch eine andere Festigkeitseigenschaft und die Farbe vom Modellmaterial und geht keine Verbindung mit dem Modellmaterial ein, so dass die Oberfläche des entstandenen Modells beim Trennen vom Stützmaterial nicht beschädigt wird. Wie die Modelle vom Stützmaterial befreit wurden, kann man in der Abbildung 6.3 sehen. In der Abbildung 6.4 aus [Alp05] ist das Funktionsprinzip des 3D-Druckers dargestellt.

<sup>19</sup> PC/ABS (Polycarbonate/Acrylnitril-Butadien-Styrol) ist ein Kunststoff, der eine geringe Schwindung aufweist und leicht zu verarbeiten ist.

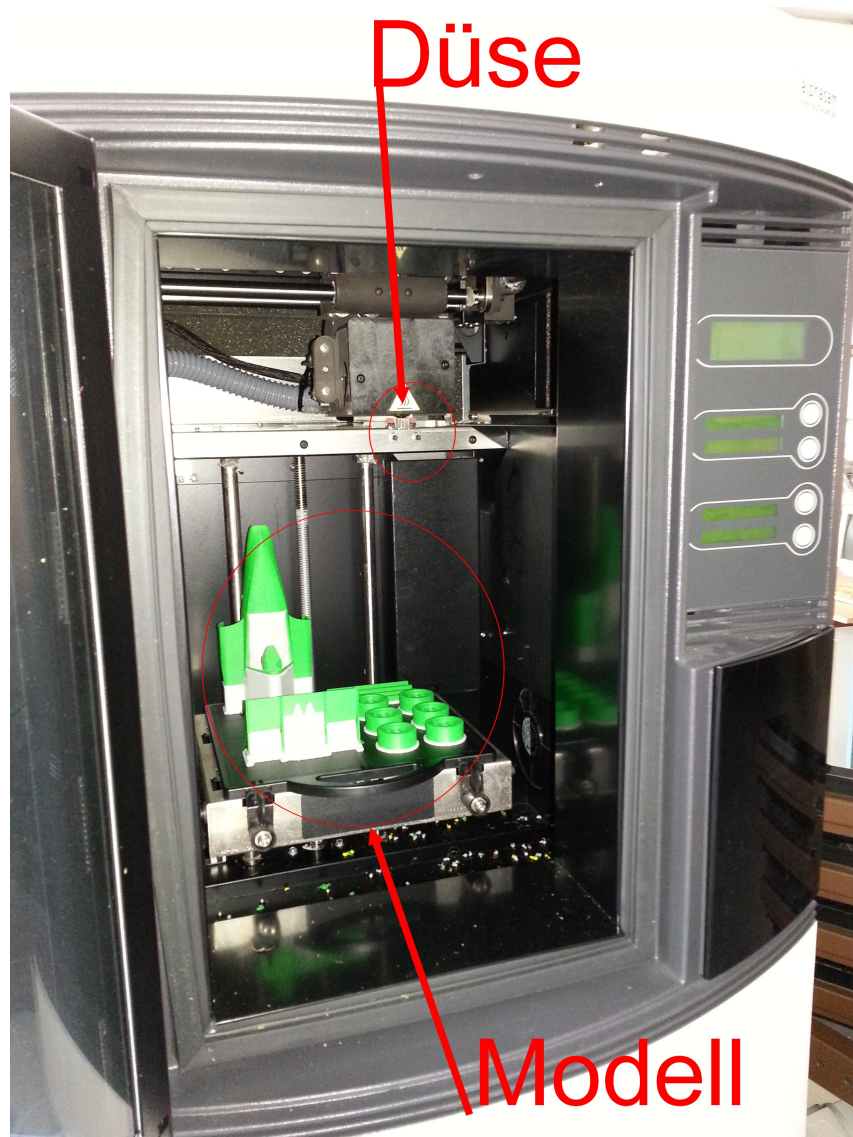


Abbildung 6.2: 3D-Drucker der Hochschule Mittweida



Abbildung 6.3: Trennen des Stützmaterials vom Modellmaterial

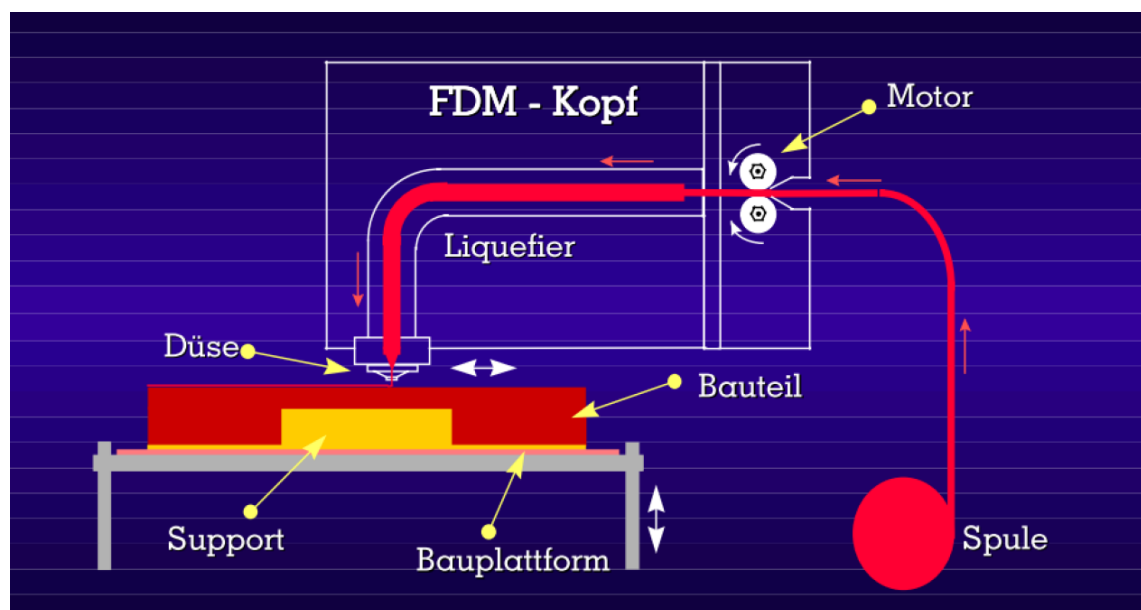


Abbildung 6.4: Funktionsprinzip des 3D-Druckers

Quelle: [Alp05]

### 6.3 Schwierigkeiten

Der vorhandenen 3D-Drucker der Hochschule Mittweida und die Art des Druckens stellte sich im Nachhinein als ein Handicap, bei dem Versuch einen realistischen Rennwagen mit dem Maßstab 1:15 zu konstruieren und zu fertigen, dar. Die Konstruktion musste sich auf die Druckermöglichkeiten reduzieren. Problematisch war dabei, dass

der Drucker nur eine minimale Materialstärke von 1 mm drucken konnte und das ein Stützmaterial aufgebracht wurde, welches später von Hand entfernt werden musste. Das Stützmaterial ist jedoch nicht so leicht von der eigentlichen Kontur der gedruckten Teile zu entfernen. Beim entfernen dieses Stützmaterial musste man sehr vorsichtig sein, da dies sonst, an kritischen Stellen, zur Zerstörung führte. Der Überrollbügel, welcher in der Abbildung 6.3 zu sehen ist, war sehr stark gefährdet. Obwohl dessen Durchmesser im Original 25,4 mm beträgt und theoretisch im Modelle 1.69 mm betragen müsste, musste notwendigerweise eine Mindestdurchmesser von 2 mm ausgeführt werden, damit beim Abbrechen des Stützmaterials der Überrollbügel nicht mit abgebrochen wurde. Im Original würde somit ein 30mm Rohrdurchmesser für den Überrollbügel eingesetzt, was nicht der Realität entspricht. Es gibt auf dem Markt heutzutage sehr gute 3D Drucker, die Konturen mit weniger als 0,1 mm Wandstärke erzeugen können, eine andere Art des Entfernen des Stützmaterials verwenden und somit geeigneter für diese Untersuchungen sind. Dabei wird nach dem Drucken des Teils, das Teil ins Wasser gelegt, wobei sich das Stützmaterial im Wasser löst und die Kontur des Teils erhalten bleibt. Dieses Verfahren ist für zukünftige Untersuchungen zu empfehlen, da es eine realistischere Untersuchung ermöglicht als jenes Verfahren, welches in dieser Arbeit verwendet worden ist.

Da verschiedene Modelle untersucht werden sollten, die jeweils eine verschiedene Konfiguration besitzen, war man darauf angewiesen, dass man sich was überlegt, dass nicht für jede Konfiguration eines Rennwagens alle Teile immer wieder neu druckt. Das Drucken ist teuer, benötigt viel Energie und ist zeitaufwändig. Um dies zu verhindern, wurde eine Schraubverbindung ausgewählt. Damit ist es möglich neue Frontflügel, Heckflügel sowie Diffusoren zu testen, ohne, dass jedes mal ein komplettes Fahrzeug gedruckt werden muss.



## **7 Konstruktion und Anpassung der Messvorrichtung zur Messung des Abtriebs am Unterboden**

### **7.1 Windkanal**

In Abbildung 7.1 sieht man einen Rennwagen bei einer strömungstechnischen Untersuchung in dem Windkanal, der für die Untersuchungen genutzt werden soll. Hierbei wurden Messwerte aufgenommen, um zu testen, ob der Widerstandsbeiwert  $c_w$  und der Auftriebsbeiwert  $c_A$ , auch bei nur geringfügigen Änderungen des Modells, ebenfalls eine Veränderung annehmen. Die Messungen zeigen, dass durch das Hinzufügen von zwei Steckschlüsseln der  $c_w$ -Wert und der  $c_A$ -Wert sich verändern. Dies ist in der Abbildung 7.2 dargestellt. Da verschiedene Modelle mit verschiedenen Konfigurationen untersucht werden sollen, muss das Messsystem des Prüfstands so sensibel sein, dass es auch leichte Veränderung erfassen kann. Dieses scheint nach dieser ersten Probeuntersuchung erfüllt zu sein. Daher ist mit dem Windkanal der Uni Bayreuth eine gute Basis für die kommenden strömungstechnischen Untersuchungen und Analysen gelegt.

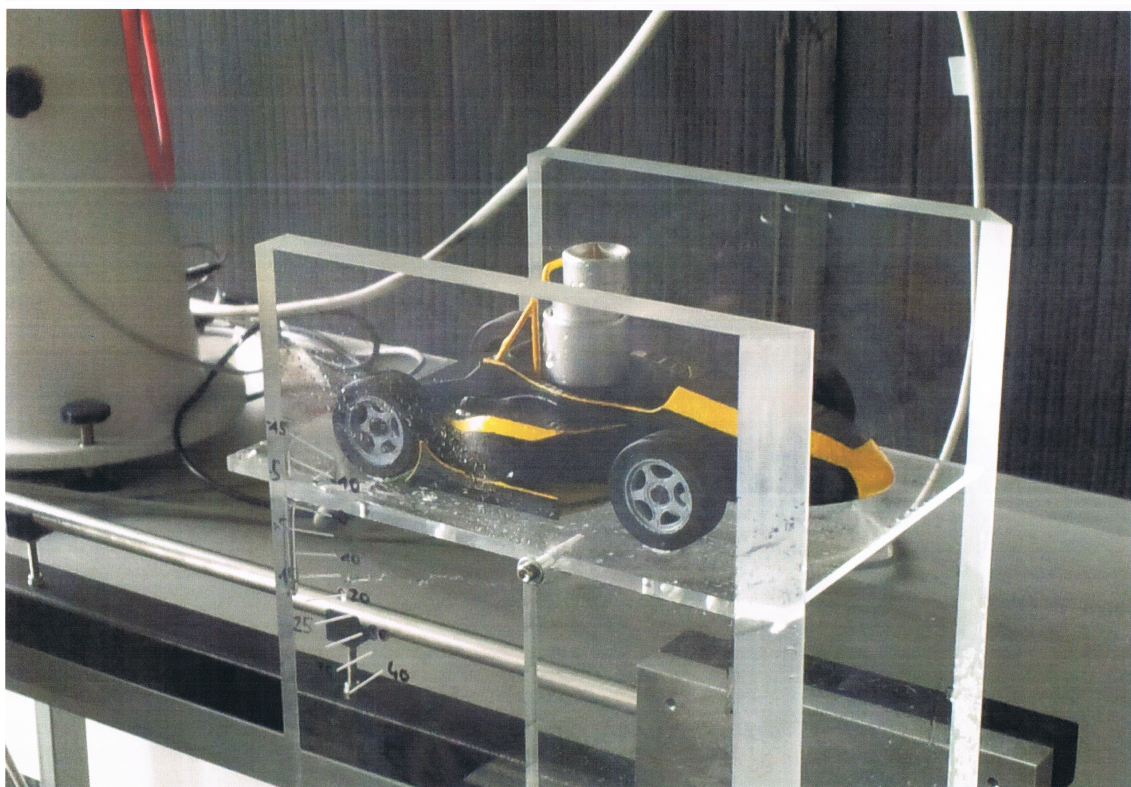


Abbildung 7.1: Testauto im Windkanal der Uni Bayreuth



2. Widerstands- und Auftriebsbeiwerte

Fläche ohne Fahrer: 0.00344 m<sup>2</sup>  
Dichte Luft: 1.173 kg/m<sup>3</sup>

Fläche mit Fahrer: 0.00394 m<sup>2</sup>

u(m/s)	Leer			Leer + Rennwagen (oF)			Rennwagen (oF)			Leer + Rennwagen (mF)			Rennwagen (mF)		
	F_A (N)	F_W (N)	F_A (N)	F_A (N)	F_W (N)	F_W (N)	F_A (N)	c_A	F_W (N)	c_W	F_A (N)	F_W (N)	c_A	F_W (N)	c_W
1.59918	0	0.003	-0.002	-0.002	0.008	0.008	-0.002	-0.470	0.005	1.176	-0.004	0.011	-0.800	0.008	1.599
3.9712	-0.0005	0.019	-0.012	-0.012	0.044	0.044	-0.01149	-0.438	0.025	0.953	-0.017	0.051	-0.535	0.032	1.037
6.36331	-0.001	0.05	-0.024	-0.024	0.109	0.109	-0.023	-0.342	0.059	0.876	-0.038	0.125	-0.467	0.075	0.947
8.83175	-0.001	0.093	-0.043	-0.043	0.210	0.210	-0.042	-0.324	0.117	0.902	-0.065	0.238	-0.419	0.145	0.950
11.2512	-0.001	0.152	-0.058	-0.058	0.342	0.342	-0.057	-0.271	0.19	0.903	-0.1	0.388	-0.400	0.236	0.953
13.7412	-0.002	0.224	-0.064	-0.064	0.508	0.508	-0.062	-0.197	0.284	0.905	-0.142	0.576	-0.379	0.352	0.953
16.2168	-0.004	0.307	-0.079	-0.079	0.702	0.702	-0.075	-0.172	0.395	0.903	-0.192	0.793	-0.365	0.486	0.945
18.6951	-0.01	0.404	-0.101	-0.101	0.924	0.924	-0.091	-0.157	0.52	0.895	-0.252	1.048	-0.354	0.644	0.942
21.1451	-0.012	0.512	-0.135	-0.135	1.179	1.179	-0.123	-0.165	0.667	0.897	-0.33	1.340	-0.364	0.828	0.947
23.503	-0.013	0.631	-0.17	-0.17	1.455	1.455	-0.157	-0.171	0.824	0.897	-0.4	1.640	-0.358	1.009	0.934

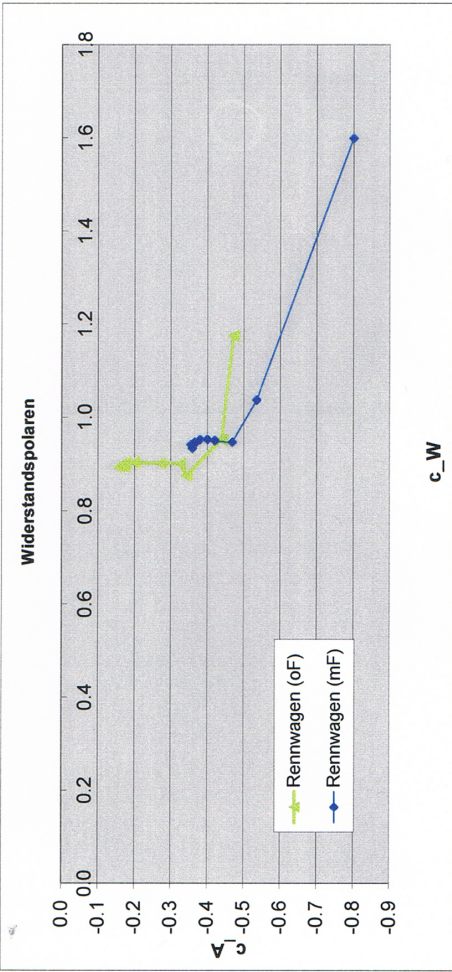


Abbildung 7.2: Messwerte des Testautos im Windkanal der Uni Bayreuth

## 7.2 Funktionsweise des Messsystems

Beim messen steht das Modell auf einer Platte, die mit einer DMS<sup>20</sup>-Wägezelle ausgestattet ist. Diese Wägezelle ist ein Kraftsensoren, der nicht direkt die Kraft misst, sondern das Gewicht. Das Besondere an den Wägezellen ist jedoch, dass sie sehr hohe Wiegegeschwindigkeiten haben d.h., dass Ergebnisse einer Wägungen innerhalb von Sekundenbruchteilen aufgenommen werden. Diese Wägezelle ist ein biegeschwacher Träger, der sich bei kleinsten Veränderung elastisch verformt. Diese Verformung wird dann von den Dehnungsmessstreifen erfasst und in einem elektrischen Signal umgewandelt. Die Messungen erfolgen auf 1mg genau [Wei13]. Die bei den Versuchen entstehenden Querschubspannungen werden hierbei über Dehnungsmessstreifen gemessen. Die Kraft in Richtung der Anströmung wird also gemessen. Größen wie Luftdichte, Stirnfläche und Anströmgeschwindigkeit sind bekannt und über die Formeln 3.5 und 3.7 werden die Widerstandsbeiwerte und die Auftriebsbeiwerte errechnet.

## 7.3 Funktion der Messvorrichtung

Die zusätzliche Vorrichtung, die in der Abbildung 7.3 zu sehen ist, wurde speziell für die Messung von den Fahrzeugmodellen konstruiert und gebaut. Diese Vorrichtung ist

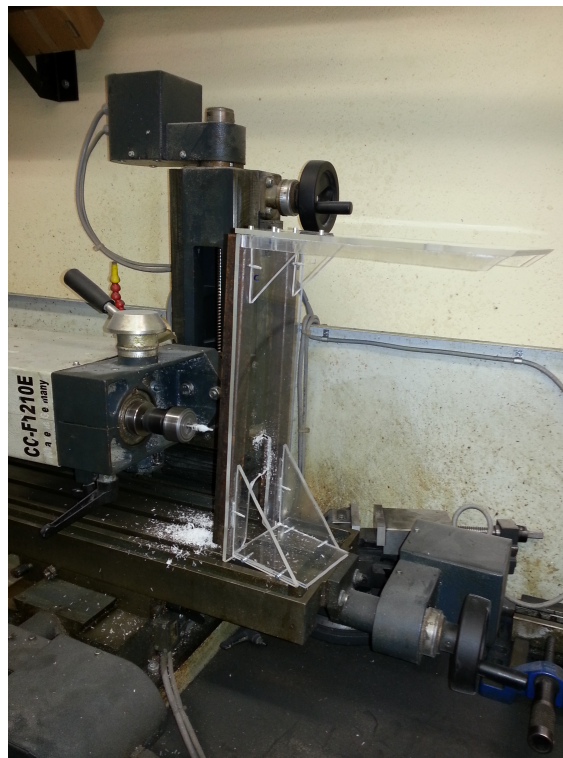


Abbildung 7.3: Vorrichtung

daher nötig, da die Messvorrichtung in der Universität Bayreuth, welche in der Abbil-

<sup>20</sup> DMS = Dehnungsmessstreifen

ding 7.4 zu sehen ist, lediglich den Gesamtabtrieb misst. Dabei ist es nicht möglich den Bodeneffekt, sowie den einzelnen Abtrieb, den die Vorderachse oder Hinterachse verursacht, mit einzubeziehen. Damit man diese Fälle mit einbezieht, wurde diese Vorrichtung an der gegebenen Messvorrichtung angepasst. Der Bodeneffekt entsteht zwischen der Fahrbahn und dem Unterboden, Diffusor und dem Frontflügel. Dabei soll der Abtrieb, der durch den Bodeneffekt entsteht über Magneten auf die eigentlichen Messplatte übertragen werden. Das Messsystem ermittelt den entstehenden Abtrieb, über die Kraft, die die Magneten, auf die Messplatte übertragen. Man kann hierbei das Modell einfach von den Magneten trennen, da es nur eine magnetische Verbindung ist. Will man nur den Abtrieb einer Achse ermitteln, dann nimmt man die Magnete, die ja als Übertragungselemente zwischen Rad und der Messplatte dienen, an der anderen Achse ab.

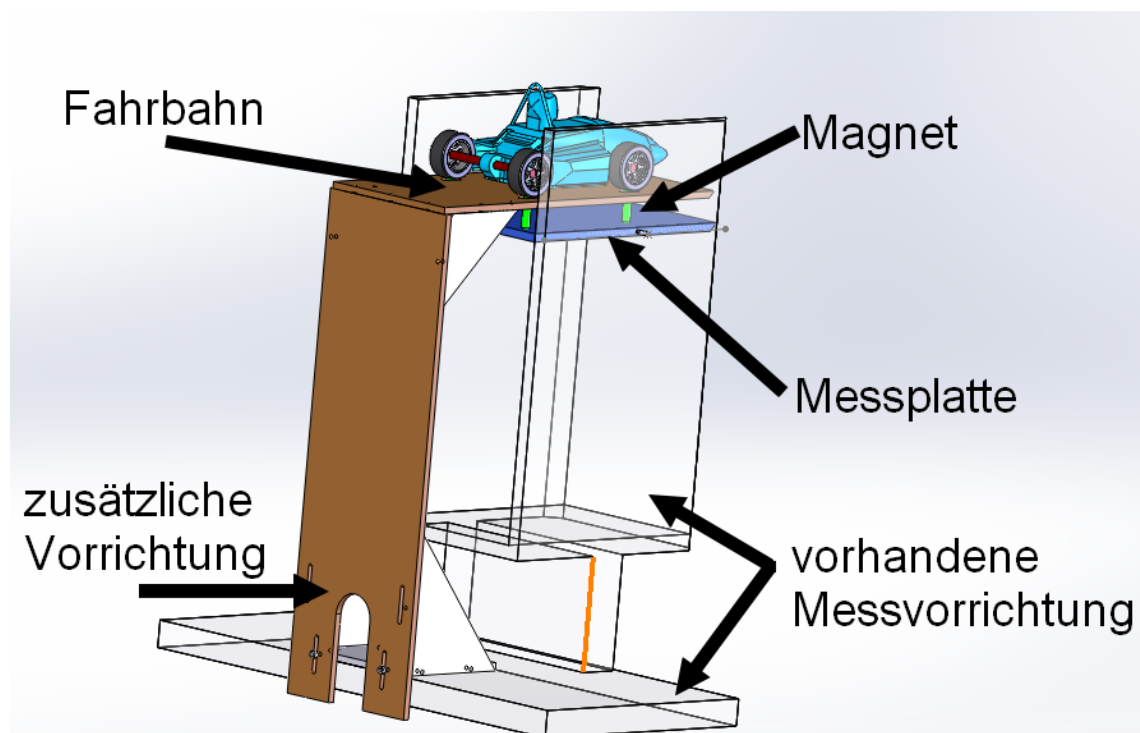


Abbildung 7.4: Messvorrichtung - Übersicht

Es ist eine einfache Konstruktion, die aus 6 mm starken PVC Platten gefertigt wurde. Dies wurden ausgewählt, weil sich die PVC Platten, durch das Hinzufügen von Versteifungselementen, als steif und stabil genug für die Anwendung erwiesen haben. Eine Option war es diese Vorrichtung auch aus Aluminiumplatten herzustellen, doch in Angesicht dessen, dass die Fertigung nicht von eigener Hand möglich war und das dieses zeit- und kostenintensiver ist, wurde die Variante mit dem PVC Platten gewählt. Eine Höhenverstellung ist durch Langlöcher, wie in der Abbildung 7.4 zu sehen, ermöglicht wurden.

## 8 Strömungssimulation

Die Strömungssimulationen sind mit dem Simulationstool Flow Simulation von SolidWorks durchgeführt worden. Diese Software ermöglicht es, Strömungsberechnungen fluider Medien auf Basis der CFD-Technik durchzuführen. Flow Simulation dient dazu, ein Modell, welches von fluiden Medien umströmt oder durchströmt wird, zu berechnen. Wichtige Größen wie die Druckverteilung oder die Fließgeschwindigkeit werden grafisch am Ende der Strömungsanalyse oder während dieser dargestellt. Um wichtiges Grundwissen zu erlangen, empfiehlt es sich, das Praxishandbuch Simulation in SolidWorks 2010 von Volker Krämer [Krä10] zu lesen. Obwohl dort die Inhalte der Version 2010 erklärt werden, kann man das Grundprinzip gut nachvollziehen. In der Version von 2012 hat sich bis dahin nicht viel bei der Dateneingabe geändert. Außerdem kann man sich auf der Internet-Seite [WWW.YOUTUBE.COM/SOLIDWORKS](http://WWW.YOUTUBE.COM/SOLIDWORKS) diverse Übungsvideos über das Simulieren anschauen und dabei lernen. Die präzisesten Informationen über die einzelnen Anwendungen erhält man jedoch nach wie vor in der SolidWorks Hilfeleiste. Unter Menü HILFE/SOLIDWORKS SIMULATION/FLOW SIMULATION HILFETHemen ist das online Benutzerhandbuch für Flow Simulation zu finden, in dem detailliert alles Nützliche zum Thema Flow Simulation erklärt ist. Insgesamt liefert dieses Simulationstool bei richtiger Eingabe der Bedingungen gute Ergebnisse. Damit die Simulation realitätsgetreu wie möglich wurde, wurde der gleiche Aufbau<sup>21</sup> wie im Windkanal realisiert.

### 8.1 Anleitung zur Simulation

Bei der Simulation eines Modells sollte sich der Durchführende darüber bewusst sein, dass die Ergebnisse eines Simulationstools immer durch Ergebnisse realer Versuche, beispielsweise eines Tests im Windkanal, verifiziert werden müssen. Der Einsatz computergestützter Simulationen kann bei der Verbesserung konstruktiver Entwürfe jedoch eine große Hilfe sein. Durch diese Anwendungen kann die Idee bis zum Endprodukt schneller und ohne größeren Aufwand verwirklicht werden, da vieles schon hierbei erkannt und verbessert wird. Die Anzahl der Prototypen zur Untersuchung im Windkanal kann somit auf einen geringen Wert reduziert werden.

Nachfolgend wird ein kompletter Simulationsverlauf eines Modells dokumentiert, um den Werdegang der Ergebnisse nachvollziehbar zu machen und Besonderheiten aufzuzeigen.

Der erste Schritt beginnt schon mit der Konstruktion des Modells. Dieses Modell sollte simulationsfreundlich konstruiert werden. Simulationsfreundlich meint hierbei, dass Komponenten oder Teile, die keine wesentliche Rolle spielen, vereinfacht dargestellt

<sup>21</sup> Siehe hierzu die Abbildung 7.4 im Abschnitt 7.3.

oder weggelassen werden sollten. Jedes Extra kostet Rechenleistung und Berechnungen eines Modells, bei dem das Netz sehr fein ist, können Tage dauern. Ist die Konstruktion eines Modells oder einer Baugruppe abgeschlossen, werden unter MENÜ/ZUSATZANWENDUNG das Simulationstool Flow Simulation aktiviert und alle nicht benötigten Zusatzanwendungen deaktiviert. Denn jede zusätzliche Anwendung kostet wieder Rechenleistung, die man für die Berechnungen braucht. Im Anschluss erscheint die Oberfläche von Flow Simulation. Sie besteht aus diversen Funktionen, wobei nachfolgend nur auf die Funktionen, die man für das zu untersuchende Modell benötigt, näher eingegangen wird.

Der zweite Schritt beginnt mit der Untersuchung der Geometrie des CAD-Modells. Unter FLOW SIMULATION/WERKZEUGE/GEOMETRIE PRÜFEN wird das Fenster „Geometrie prüfen“ geöffnet. Dort kann man auswählen, ob die Geometrieuntersuchung für externe oder interne Bedingungen einer Strömungssimulation geprüft werden soll. Das Prüfen der Geometrie ist sehr wichtig, da das Programm hierbei erkennt, ob die Körper Geometriefehler, wie z.B. nicht geschlossene Konturen, aufweisen. Einige kleinere Fehler werden von der Software eigenständig behoben. Größere Fehler müssen dann durch eine Überarbeitung des Modells behoben werden. Sollte das Überarbeiten nicht funktionieren oder zu kompliziert erscheinen, da das ganze Modell neu konstruiert werden müsste, wird empfohlen, die vorhandene Datei oder Baugruppe als IGES<sup>22</sup>-Datei (\*.igs) abzuspeichern. Diese Datei sollte dann in SolidWorks geladen und als Baugruppe (\*.sldasm) oder Teil (\*.sldprt) wieder abgespeichert werden. Weiterhin sollte man bei der Konstruktion Flächenmodelle meiden, da Flow Simulation diverse Fehlermeldungen anzeigt. Bei der anschließenden Neukonstruktion wurde bei dieser Bachelorarbeit nur mit Volumenmodellen konstruiert. Fehlermeldungen blieben dann aus.

---

<sup>22</sup> IGES steht für Initial Graphics Exchange Specification und definiert ein neutrales, herstellerunabhängiges Datenformat, das dazu dient, CAD-Dateien mit Anderen leichter auszutauschen.



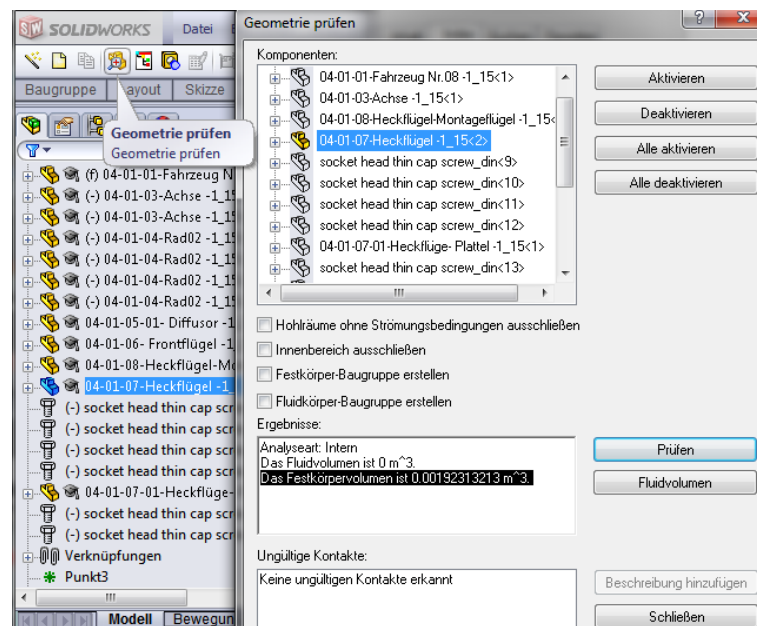


Abbildung 8.1: Maske - Geometrie prüfen

Ist diese Hürde überwunden, dann kann man mit dem ersten Simulationsprojekt starten. Dazu geht man über die Menüleiste FLOW SIMULATION/PROJEKT/ASSISTENT oder FLOW SIMULATION/PROJEKT/NEU und beginnt die Eingabe mit dem Namen des Projekts in der ersten Maske *Assistent-Projektname*. Hier wird ein Projekt namens SIM-CAR-ORIGINALGRÖSSE angelegt. Man kann jetzt den Konfigurationsnamen festlegen, falls mit demselben Modell noch weitere Strömungsuntersuchungen stattfinden sollen. Da das Modell auch noch mit anderen Geschwindigkeiten untersucht werden soll, muss auch der Konfigurationsname SIM-CAR-ORIGINALGRÖSSE-60KMH eingegeben werden.

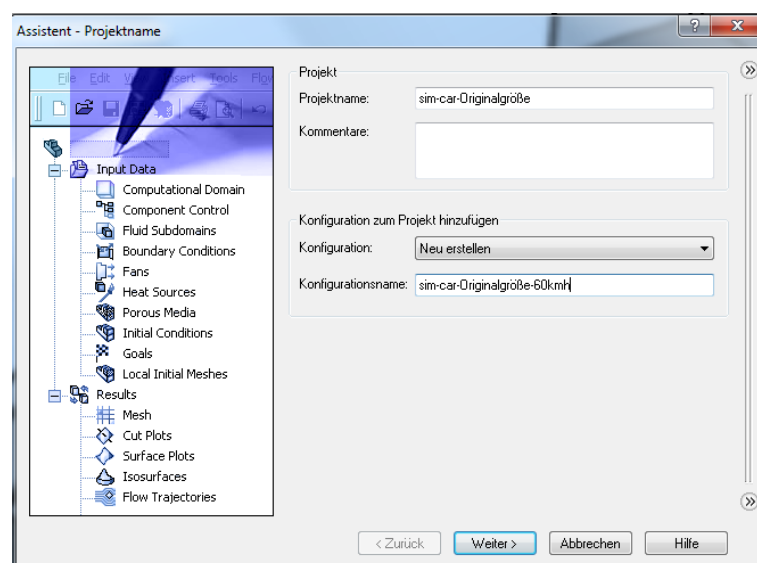


Abbildung 8.2: Assistent-Maske 1 - Projektname

Der Button NEXT führt zur nächsten Maske *Assistent-Einheitensystem*, wo das Einheitensystem ausgewählt und anschließend die Einstellungen der Einheiten für das Projekt vorgenommen werden. Wie in der Abbildung 8.3 dargestellt, kann man die Angabe der Einheiten für seine eigenen Bedürfnisse anpassen.

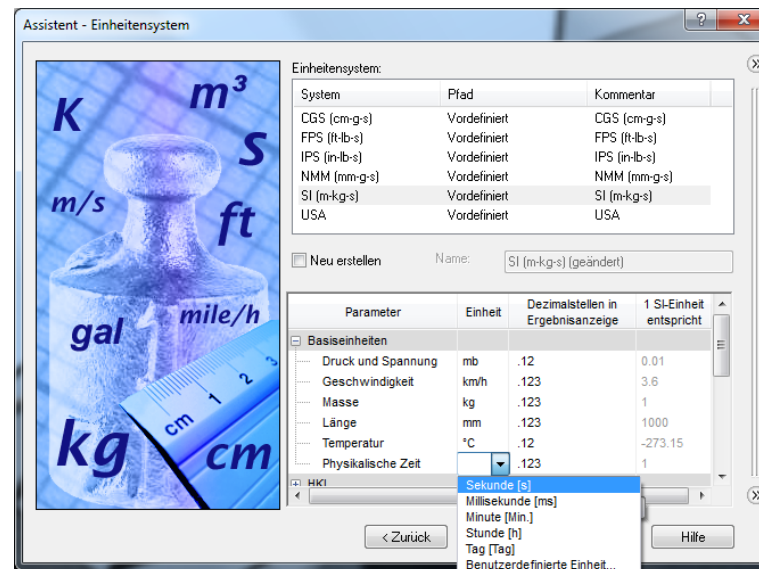
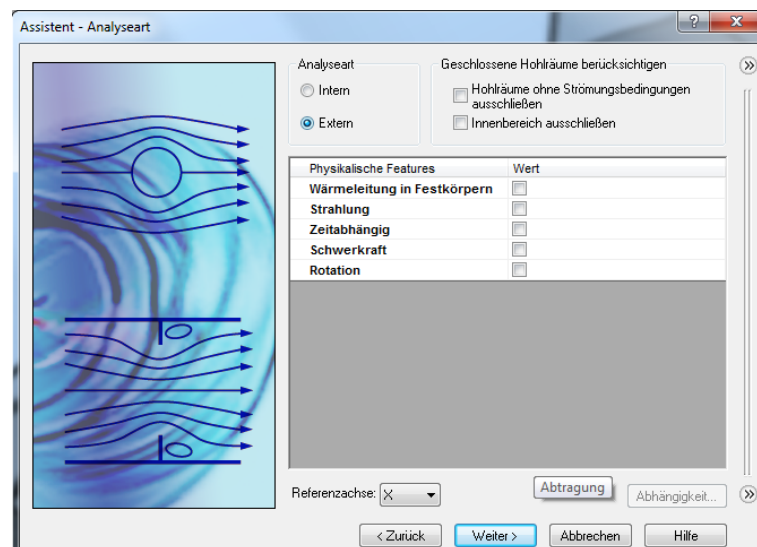
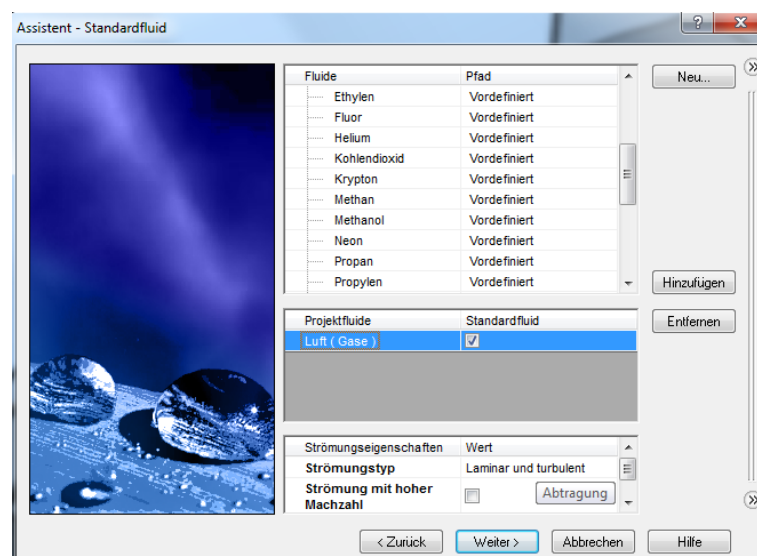


Abbildung 8.3: Assistent-Maske 2 - *Einheitensystem*

In der dritten Maske *Assistent-Analyseart* wird der Analysetyp bestimmt. Hierbei wird der Typ EXTERN gewählt, da die Umströmung des Modells berechnet werden soll. Weil die Anströmung aus der X-Achse erfolgen soll, wird als Referenzachse X ausgewählt. Nicht ausgewählt werden INNENBEREICH und HOHLRÄUME OHNE STRÖMUNGSBEDINGUNGEN, da die Einstellung ohne sie die besten Werte geliefert hat. Weiterhin werden die physikalischen Features ausgelassen, da sie bei dieser Berechnung von geringer Bedeutung sind.

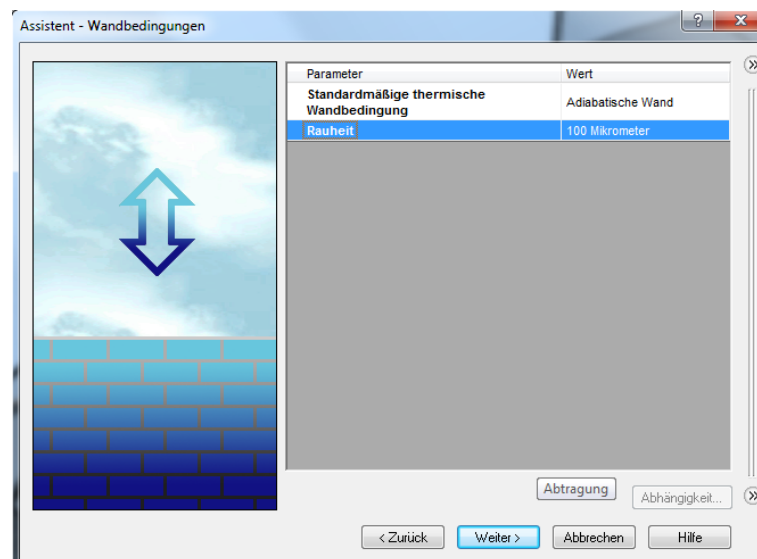
Abbildung 8.4: Assistent-Maske 3 - *Analyseart*

In der Nächsten Maske *Assistent-Standardfluid* wird das Projektfluid LUFT ausgewählt. Auch möglich wären Berechnungen mit mehreren Fluiden. Da nicht mit hohen Geschwindigkeiten zu rechnen ist, wird das Kontrollkästchen STRÖMUNG MIT HOHER MACH-ZAHL nicht betätigt.

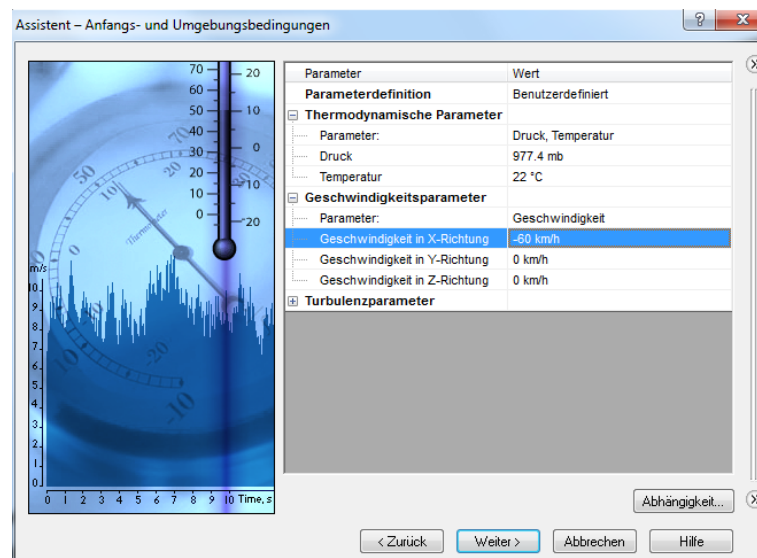
Abbildung 8.5: Assistent-Maske 4 - *Standardfluid*

Nun kommt die Maske *Assistent-Wandbedingungen*, in der man die Rauheit sowie die thermische Wandbedingung einstellen kann. Da davon auszugehen ist, dass der Wärmeaustausch keinen größeren Einfluss auf den Abtrieb und den Widerstand bei diesem Fahrzeugmodell hat, wird die Bedingung ADIABATISCHE WAND ausgewählt. Die Rauheit wurde bei dem Modell auf  $100\ \mu\text{m}$  geschätzt.



Abbildung 8.6: Assistent-Maske 5 - *Wandbedingungen*

Als nächstes erscheint die Maske *Assistent-Anfangs- und Umgebungsbedingungen*, in der diverse Parameter eingestellt werden müssen. Hierbei wurden bei der Bachelorarbeit der Ausgangsdruck auf  $977.4\text{ mb}$  und die Anfangstemperatur auf  $22^\circ\text{C}$  eingestellt. Diese Werte entsprechen den Anfangsbedingungen, die bei der Untersuchung des orangen Testautos (Konfiguration: CAR-ORANGE) im Windkanal der Uni Bayreuth (Siehe Abschnitt 7.1) existierten. Die Geschwindigkeit wurde auf  $60\frac{\text{km}}{\text{h}}$  abgesenkt, da hierbei der statische Zustand bei  $60\frac{\text{km}}{\text{h}}$  Anströmgeschwindigkeit berechnet werden soll. Die Turbulenzparameter wurden bei den Untersuchungen auf den Standardwerten belassen.

Abbildung 8.7: Assistent-Maske 6 - *Anfangs und Umgebungsbedingungen*

Die letzte Maske heißt *Assistent-Ergebnis- und Geometrieauflösung* und definiert die Grundeinstellung für die Vernetzung des Modells. Mit dem Schieberegler kann man die Auflösungsstufe der Berechnung einstellen. Je höher die Auflösungsstufe ist, desto besser die Qualität der Ergebnisse. Laut SolidWorks Hilfe erhält man bei den meisten Aufgaben schon ab der Stufe 3 zuverlässige Ergebnisse. Da in der Bachelorarbeit sehr gute Ergebnisse erzielt werden sollten, wurde die Stufe 8 eingestellt. Die Berechnungen mit dieser Stufe sind sehr langwierig und verbrauchen zwar viel Speicherplatz<sup>23</sup>, aber die Ergebnisse haben eine sehr hohe Qualität.

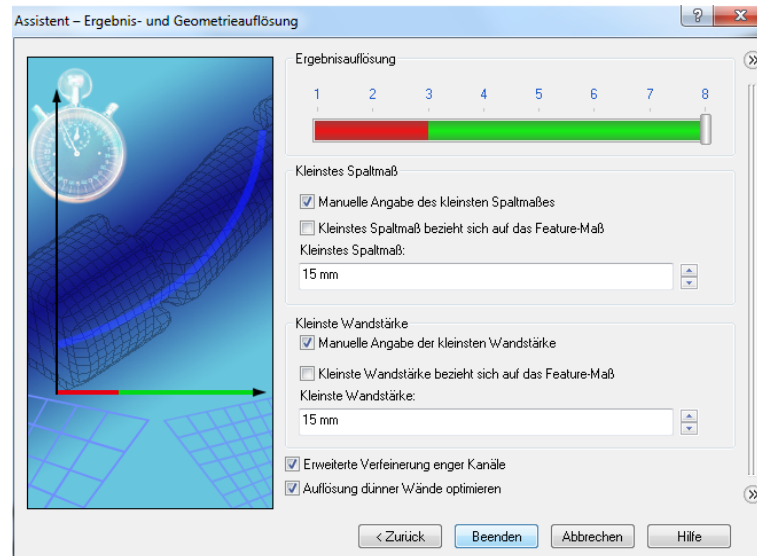


Abbildung 8.8: Assistent-Maske 7- *Ergebnisse und Geometrieauflösung*

Da bei der Vernetzung das Programm von der Gesamtgröße der Baugruppe ausgeht, kann es sein, dass einige wichtige Stellen nicht hinreichend berücksichtigt werden. Um diesem Problem entgegenzuwirken, kann man das kleinste Spaltmaß und die kleinste Wandstärke, die bei der Umströmung berücksichtigt werden sollen, manuell eingeben. Zusätzlich können die Kontrollkästchen **AUFLÖSUNG DÜNNER WÄNDE OPTIMIEREN** und **ERWEITERTE VERFEINERUNG ENGER KANÄLE** aktiviert werden, um die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen. Empfohlen wird dies jedoch nur, wenn man genug Rechnerleistung und Zeit zur Verfügung hat, denn auch die kleineren Auflösungsstufen können eine passable Qualität der Ergebnisse liefern. Mit dem Button **BEENDEN** werden die Einstellungen verarbeitet und es wird im linken SolidWorks-Bereich die Flow Simulation Baumstruktur angezeigt. Diese Baumstruktur ist in den zwei Hauptgruppen **EINGABEDATEN** und **ERGEBNISSE** unterteilt.

<sup>23</sup> Bei den Simulationen die mehrere Tage liefen, wurde Datenvolumen von mehreren Gigabyte auf der Festplatte hinterlegt.

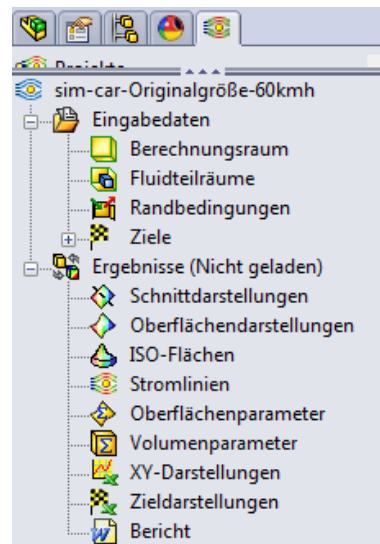


Abbildung 8.9: Flow Simulation Baumstruktur

Als nächstes wird unter EINGABEDATEN/BERECHNUNGSRAUM der Berechnungsraum durch Ziehen der in der Abbildung 8.10 zu sehenden Pfeile oder durch die manuelle Eingabe der Werte im linken Fenster eingestellt. Hierbei sollte man darauf achten, dass man mit dem Berechnungsraum den zu analysierenden Bereich abdeckt.

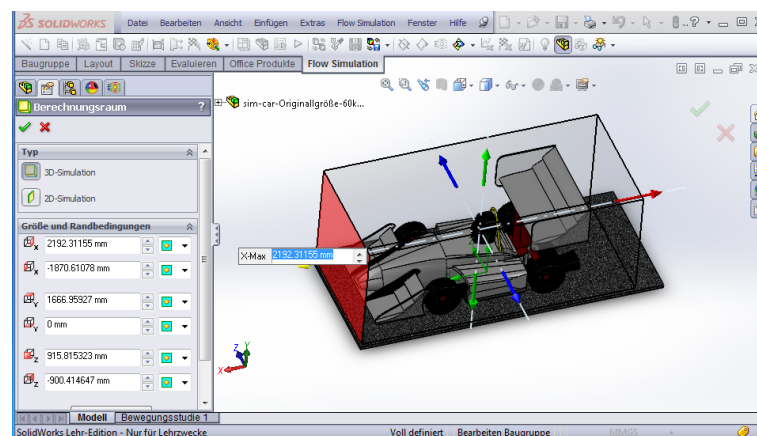


Abbildung 8.10: Einstellung des Berechnungsraums

Nun sollte man die Randbedingungen unter EINGABEDATEN/RANDBEDINGUNGEN/EINFÜGEN einstellen. Wir wählen zunächst den Typ reale Wand aus und klicken die Baugruppe des Fahrzeugs sowie die Fahrbahn an. Dabei werden die Markierten Flächen blau angezeigt. Diese Flächen werden nun in der Berechnung als Wände mit den vor-eingestellten Parametern, die man unter der Maske *Assistent-Wandbedingungen* zuvor gesetzt hatte, behandelt. Weitere Bedingungen werden für diese Berechnung nicht benötigt.

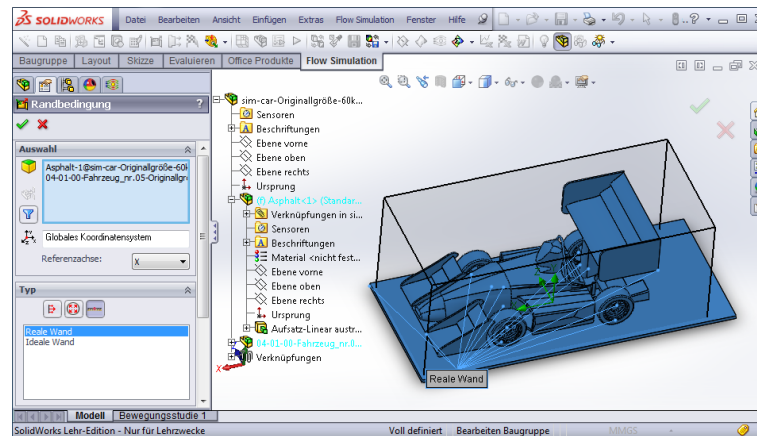


Abbildung 8.11: Randbedingung einfügen

Es werden nun die Ziele, die für den Anwender von Interesse sind, als physikalische Parameter eingegeben. Der Solver von Flow Simulation braucht Kriterien, um die Berechnung zu beenden. Laut der SolidWorks-Hilfe sind bereits Kriterien zum Beenden der Berechnung in Flow Simulation integriert, es wird aber empfohlen, sich eigene Ziele zu setzen. Eigene Ziele sorgen dafür, dass mögliche Fehler bei den Berechnungen der physikalischen Parameter (d. h. Länge, Fläche usw.) verhindert werden und wirken sich positiv auf die Gesamtrechnenzeit aus. Unter EINGABEDATEN/ZIEL/OBERFLÄCHENZIEL EINFÜGEN werden die Widerstandskraft und die Abtriebskraft definiert. Dazu muss zunächst die Oberfläche gewählt werden, für die ein Oberflächenziel definiert werden soll. Weiterhin muss die Achse festgelegt werden, auf die das Oberflächenziel Bezug nimmt. Hierbei wird für die Definition der Widerstandskraft die X-Achse und für die Definition der Abtriebskraft die Y-Achse ausgewählt. Am Ende wird das Kontrollkästchen ZIEL FÜR KONVERGENZSTEUERUNG aktiviert, damit die Berechnung erst dann beendet wird, wenn diese Kräfte berechnet wurden. Laut der SolidWorks-Hilfe kann die Berechnung auch beendet werden, bevor das Ziel konvergiert ist. Es sollen ja hierbei nicht nur die Widerstandskräfte berechnet werden, sondern auch der Widerstandsbeiwert und der Abtriebsbeiwert. Dazu fügt man über EINGABEDATEN/ZIEL/GLEICHUNGSZIEL EINFÜGEN die Gleichungen, mit denen diese berechnet werden sollen, ein. Dazu gibt man lediglich die jeweilige Formel für den  $c_W$ -Wert (siehe Gleichung 3.5) oder den  $c_A$ -Wert (siehe Gleichung 3.7) in dem Fenster AUSDRUCK ein. Hierbei kann man die angegebenen Ziele (hier: Widerstandskraft und Abtriebskraft) als Variable in die Gleichung einpflegen, wie in der Abbildung 8.12 zu sehen ist. Für die Dichte der Luft wurde  $\rho = 1,173 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  eingesetzt, für die Anströmgeschwindigkeit  $u = 16,6667 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und für die Referenzfläche  $A_R = 1,4354 \text{m}^2$ .

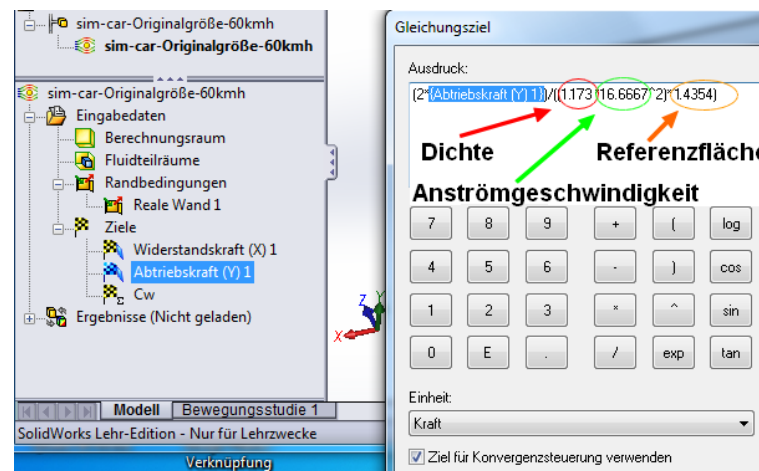


Abbildung 8.12: Definition eines Gleichungsziels

Über MENÜ/FLOW SIMULATION/ANFANGSNETZ gelangt man in die Maske Anfangsnetz. Hier kann durch die Aktivierung des Kontrollkästchens BASISNETZ ANZEIGEN das Berechnungsnetz überprüft und bei Bedarf durch die Deaktivierung des Kontrollkästchens AUTOMATISCHE EINSTELLUNG das Anfangsnetz jeweils angepasst werden.

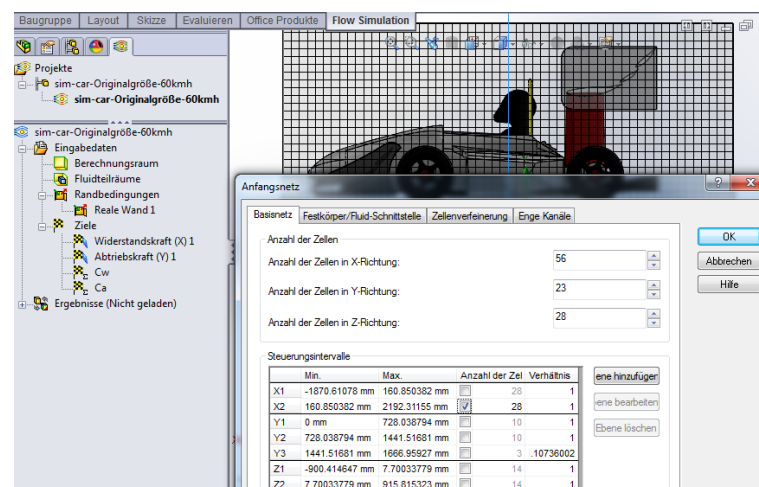


Abbildung 8.13: Manuelle Veränderung des Anfangsnetzes

Der nächste Schritt geht über MENÜ/FLOW SIMULATION/BERECHNUNGSSTEUERUNG-OPTION. Dort kann man unter STOPP-BEDINGUNGEN einstellen, wann die Berechnung beendet werden soll und unter SPEICHERN, wann und wie gespeichert werden soll. Die Einstellungen, die vorgenommen wurden, sind der Abbildung 8.14 zu entnehmen.

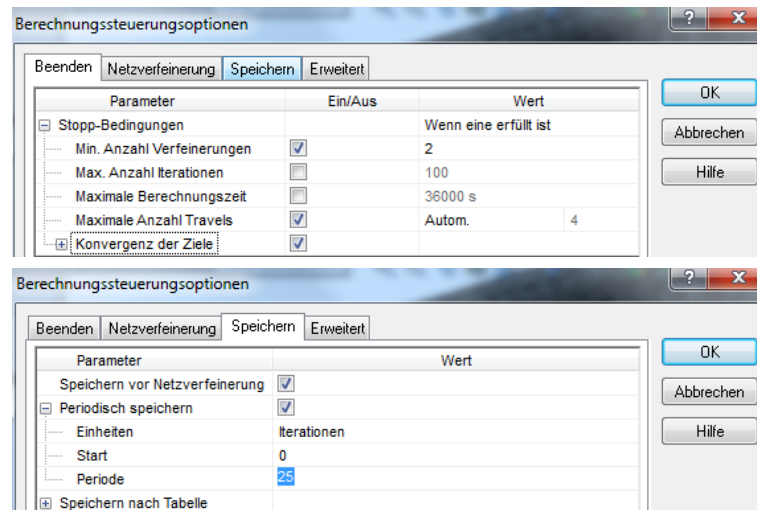


Abbildung 8.14: Berechnungsoptionen

Das letzte Fenster vor dem Berechnungsbeginn wird über MENÜ/FLOW SIMULATION/-BERECHNEN/AUSFÜHREN aufgerufen. Dort kann eingestellt werden, ob eine Berechnung fortgesetzt wird, auf welchem Computer die Berechnung stattfinden soll (ist nur bei Netzwerken interessant), wie viele Prozessoren (CPU's) zur Berechnung eingesetzt werden sollen und ob die Ergebnisse nach Abschluss der Berechnung in Form vorgegebener Darstellungen oder Berichten erstellt werden können. Letzteres wird durch das Kontrollkästchen **ERGEBNISVERARBEITUNG NACH ABSCHLUSS DER BERECHNUNG** aktiviert. Durch die Betätigung des Buttons **AUSFÜHREN** beginnt die Berechnung und endet dann automatisch, sobald die Ziele konvergiert sind.

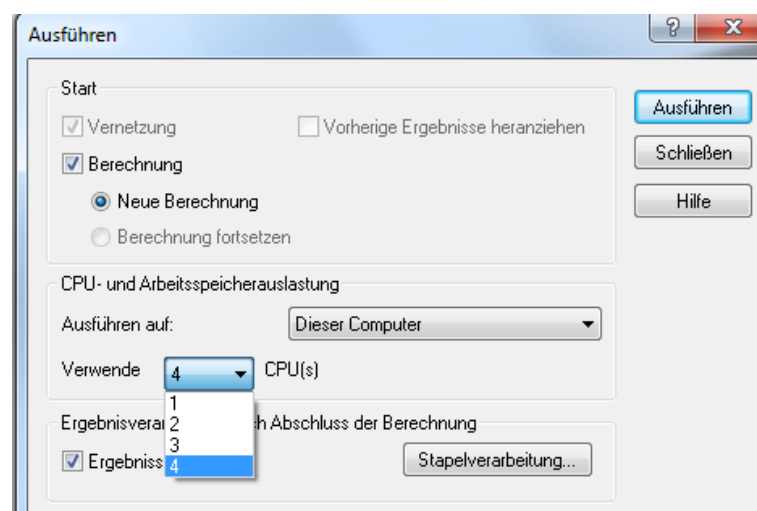


Abbildung 8.15: Maske - Ausführen

Ist die Berechnung soweit fertig, können die Ergebnisse ausgewertet werden. Man kann z.B. eine Schnittdarstellung oder eine Oberflächendarstellung mit der Kontur des Mo-

dells einblenden lassen und die Strömung optisch bewerten. Der Anwender kann sich in dieser Ansicht den Druckverlauf, den Geschwindigkeitsverlauf, den Verlauf des relativen Drucks und mehr anzeigen lassen und Schlüsse aus diesen Ergebnissen ziehen. Es können weiterhin die vordefinierten Zieldarstellungen, wie Abtriebskraft, Widerstandskraft, Auftriebsbeiwert, Widerstandsbeiwert usw. angezeigt werden und als Excel-Datei oder Word-Dokument abgespeichert werden. Dort werden alle Einstellungen, die vorgenommen worden sind und alle Ergebnisse tabellarisch aufgelistet. Auch die Berechnungszeit und vieles mehr ist dann in dem vollständigen Bericht enthalten.

## 8.2 Ergebnisse

Die Berechnungen mit der Simulationssoftware von SolidWorks wurden durchgeführt, um den eingangs formulierten Fragestellungen nachzugehen. Die Frage, ob sich der Aufwand, bei geringen Geschwindigkeiten aerodynamische Komponenten zu konstruieren, zu fertigen und dann im Waagen noch präzise einzustellen, lohne, kann derzeit nicht sicher beantwortet werden, da die Ergebnisse noch durch den Versuch im Windkanal bestätigt werden müssen. Aufgrund der Simulationsergebnisse ist jedoch den Ergebnissen der Konfigurationen CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG zu entnehmen, dass die angewendeten Komponenten für einen deutlichen Abtrieb des Fahrzeugs sorgen. In Tabelle 8.1 ist dargestellt, dass der Auftrieb von CAR-REFERENZ zu CAR-DIFFUSOR bei 30 km/h gemessen von 0,07 N auf 0,062 N sinkt. Das sind immerhin 11,4 % Zuwachs an Abtrieb die allein durch den Einsatz eines Dif-

	Komponente	Auftriebskraft [N]	Widerstandskraft [N]	Auftriebsbeiwert $C_a$	Widerstandsbeiwert $C_w$	$C_a/C_w$	Maßstab
30km/h	Car-Referenz	0,070	0,111	0,462	0,734	0,629	1:15
	Car-Diffusor	0,062	0,129	0,395	0,825	0,479	1:15
	Car-Vollausstattung	-0,366	0,284	-1,496	1,160	-1,290	1:15

Tabelle 8.1: Vergleich: CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG bei 30km/h.

fusors entstehen. In Bezug auf die Konfiguration CAR-REFERENZ steigt der Abtrieb bei der Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG sogar von 0,07 N auf -0,366 N an, was einem Anstieg von 522% entspricht. Weiterhin ist der Tabelle 8.2 zu entnehmen, dass sich bei 90 km/h die Werte nochmals steigern. Allein durch den Einsatz eines Diffusor sinkt der Auftrieb von CAR-REFERENZ zu CAR-DIFFUSOR um 47%. Verglichen zu CAR-REFERENZ steigt der Abtrieb von CAR-VOLLAUSSTATTUNG von 0,594 N auf -3,679 N sogar um 619%. Diese eindeutigen Werte beweisen, dass sich ein Einsatz aerodynamischer Komponenten auch in der Formula Student lohnt, auch wenn hier im Vergleich zu anderen Rennklassen die Geschwindigkeiten nicht so hoch sind.



	Komponente	Auftriebskraft [N]	Widerstandskraft [N]	Auftriebsbeiwert $C_a$	Widerstandsbeiwert $C_w$	$C_a/C_w$	Maßstab
90km/h	Car-Referenz	0,594	0,961	0,436	0,713	0,612	1:15
	Car-Diffusor	0,315	1,113	0,223	0,789	0,283	1:15
	Car-Vollausstattung	-3,679	2,523	-1,670	1,143	-1,461	1:15

Tabelle 8.2: Vergleich: CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG bei 90km/h.

Mit diesen Ergebnissen wird auch die zweite Frage, ob die zusätzlichen Anbauten einen spürbaren Abtrieb bewirken, beantwortet werden können. Die Werte (blau) aus der Tabelle 8.3 zeigen, dass der Einsatz eines Diffusors schon bei 30 km/h eine Wirkung von ca. 11,4%, bei 60 km/h von 54% und bei 90 km/h sogar von 47% zeigt. Da man aber die Ergebnisse der Modelle auf die der Realgröße bei den gegebenen Untersuchungsbedingungen nicht genau hochrechnen kann, wie schon im Kapitel 3 erklärt wurde, ist die Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG in dem Maßstab 1:1 simuliert worden. Diese Berechnungen sollen die ganzen Ergebnisse abrunden und einen Bezug zur Größenordnung der Werte, wie sie in der Realität vorkommen könnten, herstellen. Auch die Frage, ob ein spürbarer Abtrieb bewirkt wird, ist mit diesen Werten besser zu erklären. Die Werte in der Tabelle 8.4 zeigen, dass bei einer Geschwindigkeit von 30km/h ein Abtrieb von -103,3 N, bei 60 km/h ein Abtrieb von -512,1 N und bei 90 km/h sogar ein Abtrieb von -1184,8 N berechnet wurde. Diese Kräfte entsprechen den Gewichten von ca. 10,5 Kg, 52,2 Kg und 120,8 Kg, welche während der Fahrt das Fahrzeug an die Straße pressen würden. Diese Ergebnisse beweisen, dass die zusätzlichen Anbauten einen spürbaren Abtrieb erzeugen und sich somit die aerodynamische Betrachtung an dem Fahrzeug von TMM sehr wohl lohnt. Auch wenn für die Auslegung, die Fertigung und die anschließende Anpassung sehr viel Zeit und Geld benötigt würden. Wenn diese Werte im Realfall reproduziert werden könnten, würde es bedeuten, dass die Kurven mit einer höheren Geschwindigkeit gefahren werden können, was wiederum zu kürzeren Rundenzeiten führen könnte. Einerseits können durch die schnelleren Rundenzeit mehr Punkte bei den Rennen errungen werden. Andererseits können aber auch gut ausgelegte aerodynamische Komponenten in den Designreports der Jury in den Formula Student Wettbewerben positiv bewertet werden und somit stiege die Gesamtpunktzahl des Teams.

Ein Teil der dritten Frage, inwieweit die aerodynamischen Komponenten Auftrieb erzeugen, kann im Folgenden ebenfalls beantwortet werden. Wie die Werte der bereits aufgeführten Tabellen zeigen, besitzt jede der aerodynamischen Komponenten, die in den Versuchen eingesetzt wurden, die Eigenschaft, Abtrieb zu erzeugen. Keine der durchgeführten Simulationen lieferte Werte, dass die untersuchten Komponenten einen Auf-



	Komponente	Auftriebs- kraft [N]	Widerstands- kraft [N]	Auftriebs- beiwert $C_a$	Widerstands- beiwert $C_w$	$C_a/C_w$	Maßstab
90 km/h	Car-Referenz	0,594	0,961	0,436	0,713	0,612	1:15
	Car-Diffusor	0,315	1,113	0,223	0,789	0,283	1:15
	Car-Vollausstattung	-3,679	2,523	-1,670	1,143	-1,461	1:15
	Car-Orange	0,146	1,240	0,116	0,984	0,118	1:15
	Car-Orange Windkanal	-0,157	0,900	-0,171	0,897	-0,191	1:15
	Car-Vollausstattung- Originalgröße	-1184,835	568,244	-2,252	1,080	-2,085	1:1
	Diffusor normaler Bodenabstand	-1,180	0,199	-0,319	0,053	-6,019	1:15
	Diffusor großer Bodenabstand	-0,996	0,189	-0,267	0,051	-5,235	1:15
	Heckprofil- Originalgröße	-226,729	20,898	-4,189	0,386	-10,852	1:1
60 km/h	Car-Referenz	0,267	0,435	0,443	0,721	0,614	1:15
	Car-Diffusor	0,145	0,502	0,232	0,800	0,290	1:15
	Car-Vollausstattung	-1,560	1,123	-1,623	1,147	-1,415	1:15
	Car-Orange	0,112	0,560	0,199	0,999	0,199	1:15
	Car-Orange Windkanal	-0,080	0,450	-0,165	0,900	-0,183	1:15
	Car-Vollausstattung- Originalgröße	-512,080	249,947	-2,190	-1,069	2,049	1:1
	Diffusor normaler Bodenabstand	-0,498	0,090	-0,300	0,055	-5,455	1:15
30 km/h	Car-Referenz	0,070	0,111	0,462	0,734	0,629	1:15
	Car-Diffusor	0,062	0,129	0,395	0,825	0,479	1:15
	Car-Vollausstattung	-0,366	0,284	-1,496	1,160	-1,290	1:15
	Car-Orange	0,063	0,140	0,455	1,002	0,454	1:15
	Car-Orange Windkanal	-0,035	0,100	-0,330	0,890	-0,371	1:15
	Car-Vollausstattung- Originalgröße	-103,268	56,480	-1,766	0,966	-1,828	1:1
	Diffusor normaler Bodenabstand	-0,097	0,023	-0,235	0,056	-4,196	1:15

Tabelle 8.3: Ergebnisse-Übersicht

trieb erzeugen. Folglich ist davon auszugehen, dass korrekt ausgelegte Komponenten keinen Auftrieb erzeugen. Ob der Widerstand mit den aerodynamischen Komponenten ansteigt, kann mit diesen Ergebnissen eindeutig beantwortet werden. Der Widerstand steigt mit Zunahme der Komponenten an, wie man der Tabelle 8.5 entnehmen kann. Dort liegt der Widerstand bei der Konfiguration CAR+REFERENZ bei einem Wert von 0,435N gemessen bei 60km/h. Bei der Konfiguration CAR-DIFFUSOR steigt der Widerstand auf 0,502 N an und bei der Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG sogar auf 2,523 N. Es entsteht bei der Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG-ORIGINALGRÖSSE ein maximaler Widerstand von ca. 568 N (57,9 Kg) bei 90km/h, wie es der Tabelle 8.4 zu entnehmen ist. Die Auslegung der aerodynamischen Komponenten muss also noch optimiert werden, damit der Widerstand noch kleiner wird. Die Ergebnisse deuten weiterhin darauf, dass es am sinnvollsten ist, Frontflügel, Heckflügel und Diffusor in Kombination einzusetzen. Denn wie die Werte zeigen, dass sich das Abtriebsverhalten des Rennwa-

	Komponente	Auftriebskraft [N]	Widerstandskraft [N]	Auftriebsbeiwert $C_a$	Widerstandsbeiwert $C_w$	$C_a/C_w$	Maßstab
30km/h	Car-Vollausstattung-Originalgröße	-103,268	56,480	-1,766	0,966	-1,828	1:1
60km/h	Car-Vollausstattung-Originalgröße	-512,080	249,947	-2,190	-1,069	2,049	1:1
90km/h	Car-Vollausstattung-Originalgröße	-1184,835	568,244	-2,252	1,080	-2,085	1:1

Tabelle 8.4: Vergleich: Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG-ORIGINALGRÖSSE

	Komponente	Auftriebskraft [N]	Widerstandskraft [N]	Auftriebsbeiwert $C_a$	Widerstandsbeiwert $C_w$	$C_a/C_w$	Maßstab
60km/h	Car-Referenz	0,267	0,435	0,443	0,721	0,614	1:15
	Car+Diffusor	0,145	0,502	0,232	0,800	0,290	1:15
	Car-Vollausstattung	-1,560	1,123	-1,623	1,147	-1,415	1:15

Tabelle 8.5: Vergleich: CAR-REFERENZ, CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG bei 60km/h.

gens ständig verbessert, je mehr aerodynamische Komponenten eingesetzt werden.

Es wurde auch die Wirkung des Bodenabstandes beim Diffusor untersucht. Dazu wurden zwei Simulationen mit 90km/h gemacht. Bei der einen Konfiguration wurde der Bodenabstand um 20mm erhöht, während bei der anderen der Bodenabstand unverändert blieb. Die Ergebnisse, die man der Tabelle 8.3 (grün) entnehmen kann, zeigen eindeutig, dass der Bodenabstand einen enormen Einfluss auf die Wirkung des Diffusors hat. Ein größerer Bodenabstand sorgt dafür, dass der Abtrieb, den der Diffusor mit dem normalen Bodenabstand erzeugen würde, von -1,18 N auf -0,996 N, also um 15,6 %, sinkt. Das macht deutlich, dass der Bodenabstand bei der Konstruktion nicht zu vernachlässigen ist, wenn optimale Ergebnisse in den Wettbewerben angestrebt werden.

Des Weiteren wurde das Flügelprofil des Hecks bei einem Einstellwinkel von 9°, ohne Endplatten und Wölbungsklappen, in der Originalgröße (Maßstab: 1:1) strömungstechnisch untersucht. Diese Untersuchung sollte aufzeigen, wie viel Abtriebskraft nur das Profil selbst, bei ungestörter Strömung, bewirken würde. Den Werten aus der Tabelle 8.3, die gelb markiert sind, ist zu entnehmen, dass das Profil 226,7 N Abtrieb von den gesamt 1184,8 N und 20,9 N Widerstand von gesamt 568,2 N, erzeugt. Das ist ein Abtrieb von 19,1% bei einem Widerstand von nur 3,7 %. Damit erweist sich das Profil als ein wichtiges Element in der Gesamtauslegung.

### 8.3 Mögliche Optimierungsmaßnahmen

Nach der Studie der Ergebnisse kann man zu der Auffassung kommen, dass noch Optimierungsmaßnahmen ergriffen werden müssen. Beim Diffusor z.B. ist zu erkennen, dass bei der Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG die Luft nicht richtig in den Diffusor eingeleitet wird. Eine Möglichkeit wäre, die Leitbleche vom Beginn des Unterbodens bis zur Eintrittsöffnung des Diffusors gezielter zu verlegen, um die Luft dorthin zu leiten. Weiterhin müssen die Länge und der Anstieg des Diffusors optimiert werden, damit sich die Strömung nicht frühzeitig von der Wand ablöst. Die Anströmung des Unterbodens und des Diffusors könnte verbessert werden, wenn die Nase des Fahrzeugs flacher wäre und wenn durch Leitbleche die Strömung in den Unterbodenbereich eingeleitet werden würde. Dies würde dazu beitragen, dass sich die Wirkung des Diffusors verstärkt und der Abtrieb damit zunimmt.

Weiterhin ist festzuhalten, dass der Heckflügel sehr stark vom Überrollbügel in der Anströmung beeinflusst wird. Um eine bessere Anströmung zu erhalten, sollte der Flügel höher gesetzt werden. Dazu müssen jedoch noch Untersuchungen durchgeführt werden, die der Frage nachgehen, ob dies sinnvoll ist, da der Gesamtschwerpunkt des Fahrzeugs durch diese Maßnahme höher sein würde. Der Abstand zwischen Flügelprofil und Wölbungsklappe sollte verkleinert werden, um dort eine höhere Strömungsgeschwindigkeit zu erzeugen. Die Seitenkästen könnten stabiler gebaut werden und innen mit einem Flügelprofil ausgestattet werden, um für zusätzlichen Abtrieb zu sorgen. Außerdem müssten die Profile an den Flügeln näher untersucht werden. Es ist notwendig, zunächst eine optimale Form für den Frontflügel und eine für den Heckflügel herauszufinden, um anschließend die aus leichtem Material selbst gefertigten Flügel an das diesjährige Fahrzeug zum Testen anzubauen. Es sollten dann z.B. zwanzig Beschleunigungsfahrten und zwanzig Kurvenfahrten ohne aerodynamische Anbauten vollzogen werden und anschließend mit ihnen. Auf Basis der aufgenommenen Versuchswerte kann man herausfinden, wie die tatsächliche Wirkung auf der Fahrbahn ist. Mit solchen Versuchen könnten auch der Einstellwinkel und die Anstellwinkel der Wölbungsklappen optimiert werden. Es könnte weiterhin untersucht werden, ob es sinnvoll ist, einen mehrteiligen Flügel im Heckbereich einzubauen. Da die aerodynamische Effizienz ( $\frac{c_A}{c_w}$ ) bei einem Flügelprofil sehr hoch ist, wie der Tabelle 8.3 (rot) zu entnehmen ist, könnte der Einsatz von einem mehrteiligen Flügel sich lohnen.

### 8.4 Vergleich von Versuch und Rechnung

Die Ergebnisse, die die Strömungssimulation liefert, weichen erwartungsgemäß von den Ergebnissen im Windkanaltest ab. Von der Strömungssimulation ist nicht zu erwarten, dass sie die gleichen Werte liefert, wie der reale Versuch im Windkanal. Sie ist jedoch sehr wohl ein nützliches Feature für den Anwender, da qualitative Aussagen über Veränderungen im Modell getroffen werden können.

Die Strömungssimulation liefert also brauchbare Ergebnisse. Die Beträge der Ergebnisse von der Konfiguration CAR-ORANGE und dessen Ergebnisse aus dem Windkanal weichen nicht weit voneinander ab, wie der Tabelle 8.6 zu entnehmen ist. Es ist jedoch

	Komponente	Auftriebskraft [N]	Widerstandskraft [N]	Auftriebsbeiwert $C_a$	Widerstandsbeiwert $C_w$	$C_a/C_w$	Maßstab
30km/h	Car-Orange	0,063	0,140	0,455	1,002	0,454	1:15
	Car-Orange Windkanal	-0,035	0,100	-0,330	0,890	-0,371	1:15
60km/h	Car-Orange	0,112	0,560	0,199	0,999	0,199	1:15
	Car-Orange Windkanal	-0,080	0,450	-0,165	0,900	-0,183	1:15
90km/h	Car-Orange	0,146	1,240	0,116	0,984	0,118	1:15
	Car-Orange Windkanal	-0,157	0,900	-0,171	0,897	-0,191	1:15

Tabelle 8.6: Vergleich: Windkanal und Simulation CAR-ORANGE

zu bemerken, dass die Simulation Auftrieb berechnet, während im realen Versuch Abtrieb gemessen wurde. Es wurden alle Berechnungsergebnisse mit der gleichen Grundeinstellung berechnet und wie man schon im Abschnitt 8.2 sehen konnte, machen die Berechnungsergebnisse den Anschein, dass die Software realitätsnah gerechnet hat. Wie man der Tabelle 8.5 entnehmen kann, liefert die Simulation Werte, die realistisch erscheinen. Man sieht, dass der Auftrieb von der Konfiguration CAR-REFERENZ zu der Konfiguration CAR-DIFFUSOR von 0,267 N auf 0,145 N sinkt und anschließend bei der Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG sogar ein Abtrieb in Höhe von -1,56 N entsteht. Die Ergebnisse werden sicherlich nicht mit den des Realversuchs übereinstimmen, es ist jedoch eindeutig zu erkennen, dass die Simulationssoftware von SolidWorks tendenziell richtig rechnet. Es müssen also auch die anderen Konfigurationen im Windkanal untersucht werden um eine trefflichere Aussage zu machen. Dabei sollte jedoch auch untersucht werden, ob die Ergebnisse der Konfiguration CAR-ORANGE im Windkanal vom Anwender nicht falsch interpretiert worden sind, denn die Beträge der Werte zwischen Simulation und Versuch ähneln sich sehr. Die Abweichungen dieser Werte in Betrag gesehen, könnten mehrere Ursachen haben. Eine Ursache könnte die Druckqualität des vorhandenen 3D-Druckers sein, worüber schon in Kapitel 6.3 gesprochen wurde. Dieser sorgt für verschiedene Rauheiten an der Kontur des Fahrzeugs, sodass man dies in der Berechnung nicht mit einbeziehen konnte. Die andere Ursache ist die, dass die Stirnfläche von  $A = 0,0034 \text{ m}^2$ , die bei der Berechnung der Werte im Windkanal genutzt wurde, ungenau ist, da die Fläche aus einer Zeichnung heraus berechnet wurde.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Während dieser Arbeit wurden zunächst die allgemeinen strömungstechnischen Grundlagen dargestellt und der aktuelle Stand bei den strömungstechnischen Untersuchungen von Rennwagen näher beleuchtet. Darauf aufbauend wurden verschiedene aerodynamische Komponenten erstellt und in die Konfigurationen CAR-DIFFUSOR und CAR-VOLLAUSSTATTUNG integriert. Anschließend wurden diese Konfigurationen mithilfe der numerischen Strömungsmechanik (CFD) strömungstechnisch untersucht. Aus organisatorischen Gründen konnten die Untersuchungen im Windkanal bislang nicht durchgeführt werden. Dies soll jedoch zeitnah geschehen.

Außerdem wurde die Messeinrichtung durch eine weitere Vorrichtung ergänzt, damit auch die Einflüsse des Bodeneffekts untersucht werden können. Es wurde auch eine Einleitung zur Bedienung des Flow Simulation Tools von SolidWorks verfasst. Zum Ende der Arbeit hin wurden die Ergebnisse ausgewertet und mögliche Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt. Die Studie der Ergebnisse ergab, dass sich die aerodynamische Betrachtung für ein Formula Student Fahrzeug prinzipiell lohnt. Es sind jedoch noch einige Untersuchungen und technische Entwicklungen vonnöten, um das Fahrzeug in der Zukunft wettbewerbstauglich zu machen.

Bei den Untersuchungen ist das Augenmerk besonders auf den Abtrieb geworfen worden, um eine klare Aussage darüber zu erhalten, ob sich die aerodynamischen Betrachtungen für den Einsatz bei realen Rennen lohnen. Nach den noch ausstehenden Windkanalversuchen müssen Optimierungen an der Konfiguration CAR-VOLLAUSSTATTUNG vorgenommen werden, die daraufhin gegebenenfalls noch einmal im Strömungskanal untersucht werden. Sofern die Ergebnisse aus dem Windkanal zufriedenstellend ausfallen, sollen dann aus diesem Modell Komponenten für das reale Fahrzeug hergestellt werden, damit die Wirkung auf der Rennstrecke getestet werden kann. Dazu müssen verschiedene Herstellungsverfahren für den Flügel und den Diffusor genauer untersucht werden.

## **Anhang A: Bildmaterial vom 3D-Drucken**



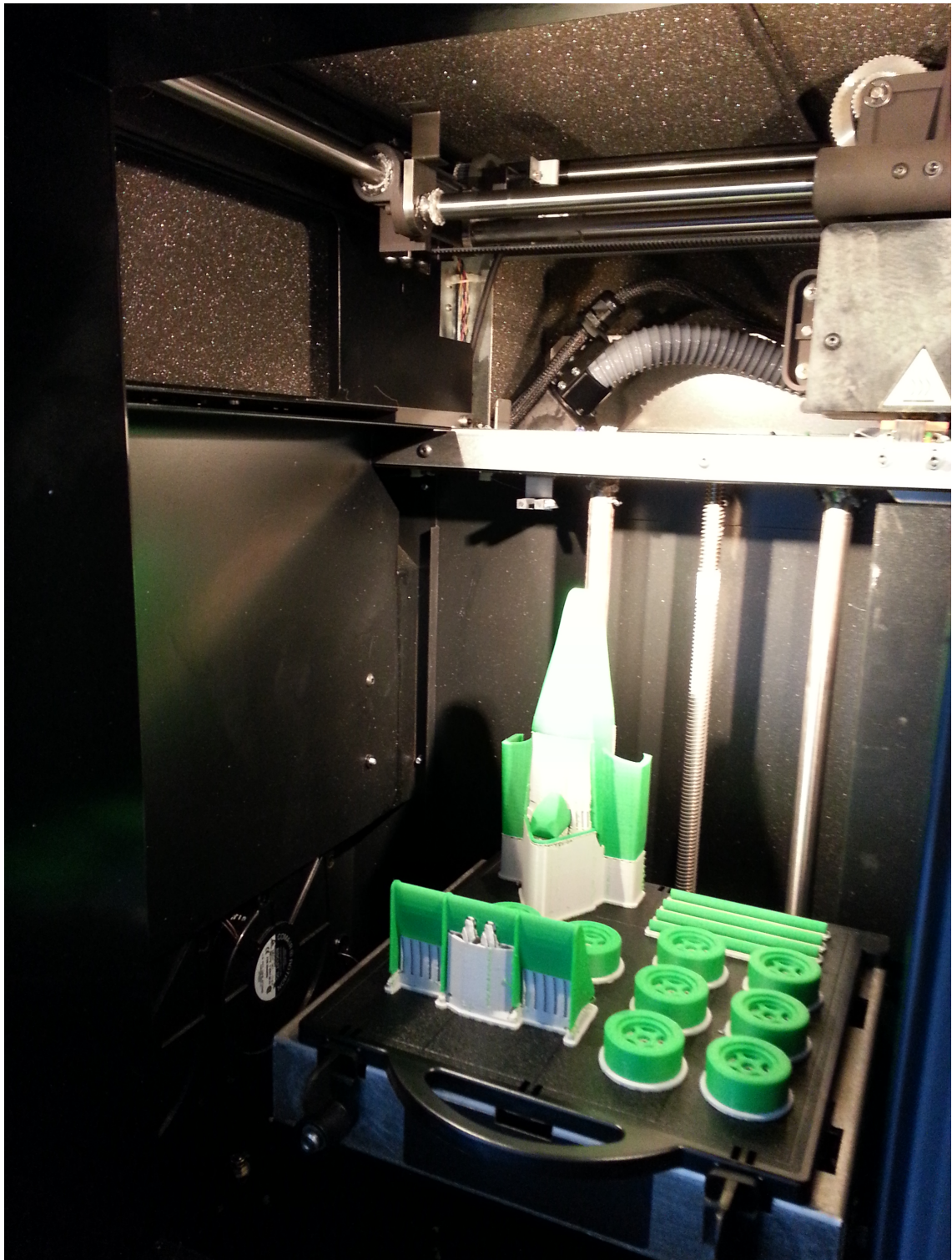


Abbildung A.1: 3D-Drucker

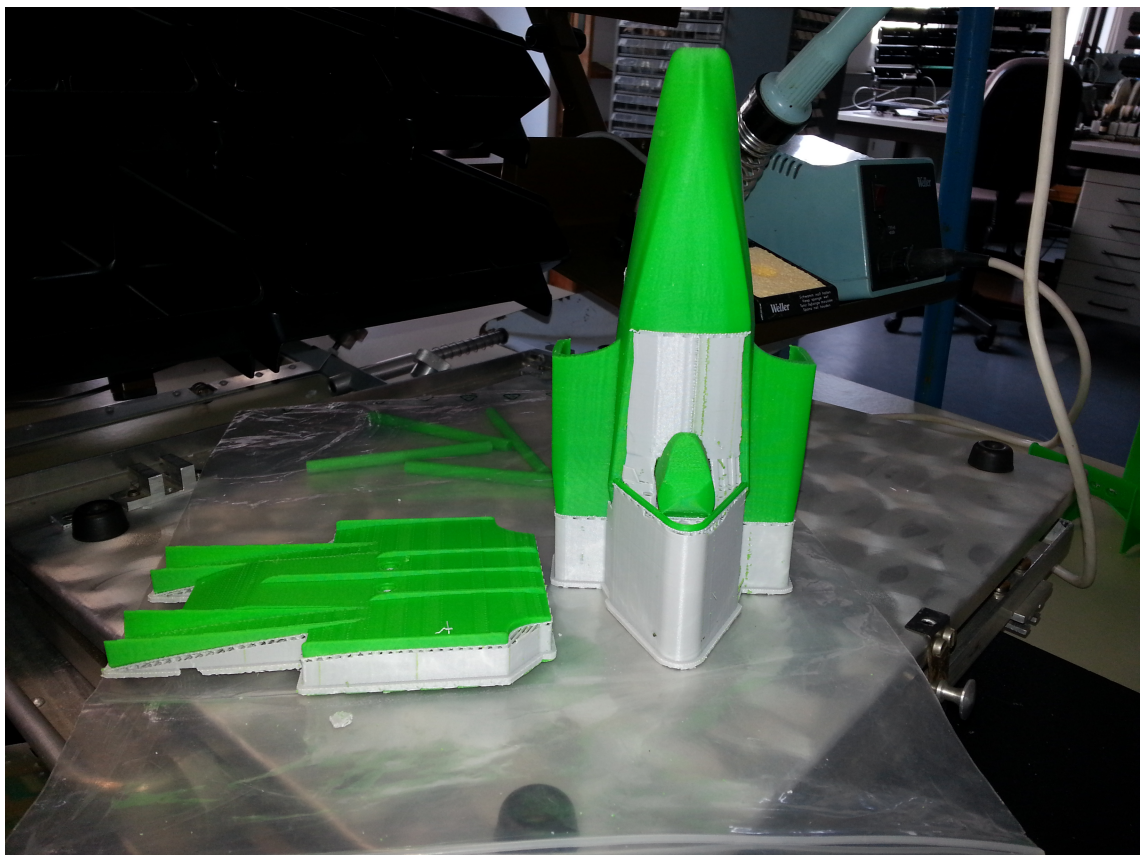


Abbildung A.2: Komponenten nach dem Drucken





Abbildung A.3: Fahrzeuge nach dem die Einzelteile zusammengefügt wurden.

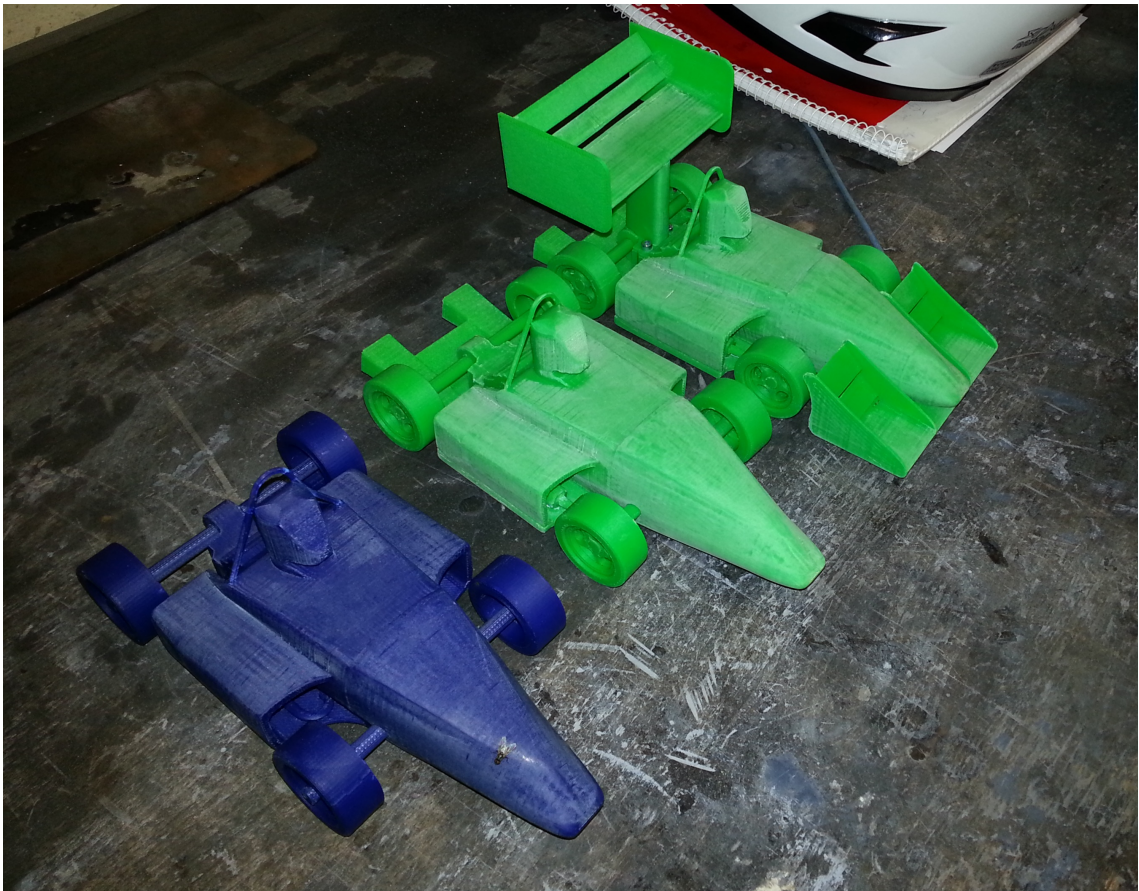


Abbildung A.4: Die drei Konfigurationen

## **Anhang B: Bildmaterial zu den Simulationen**



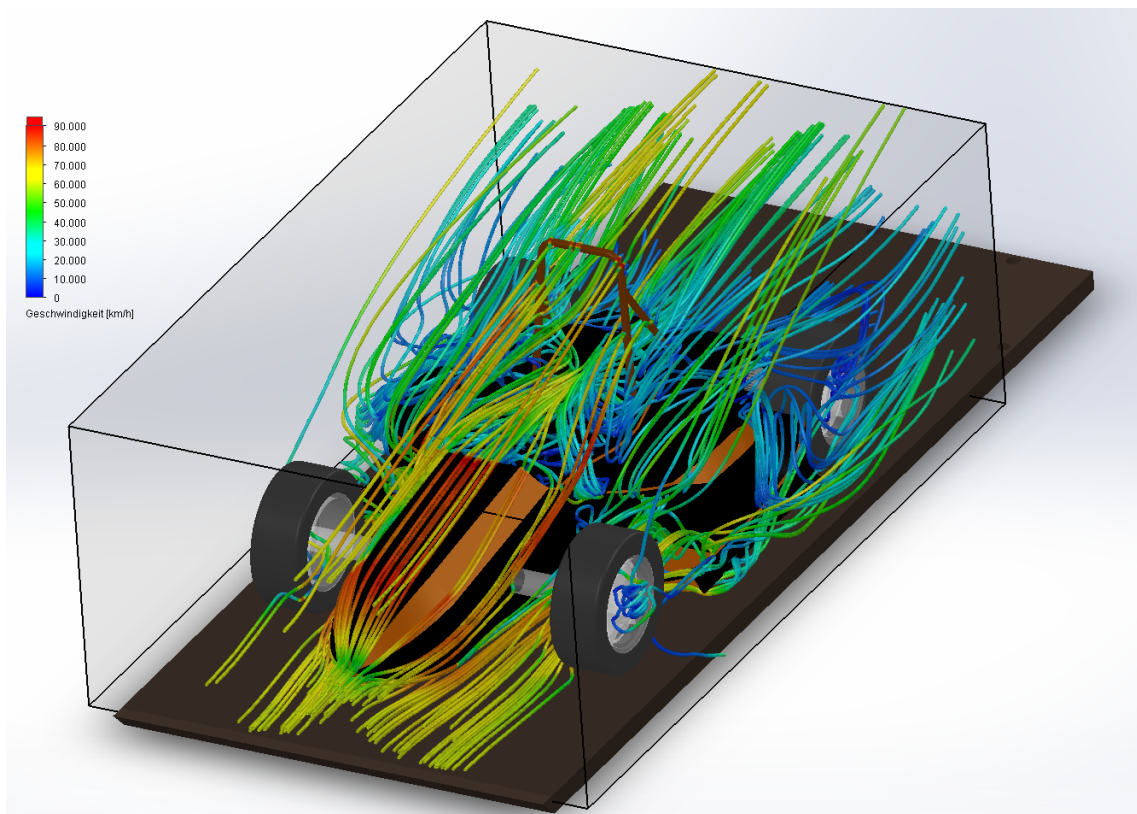


Abbildung B.1: Car-Orange

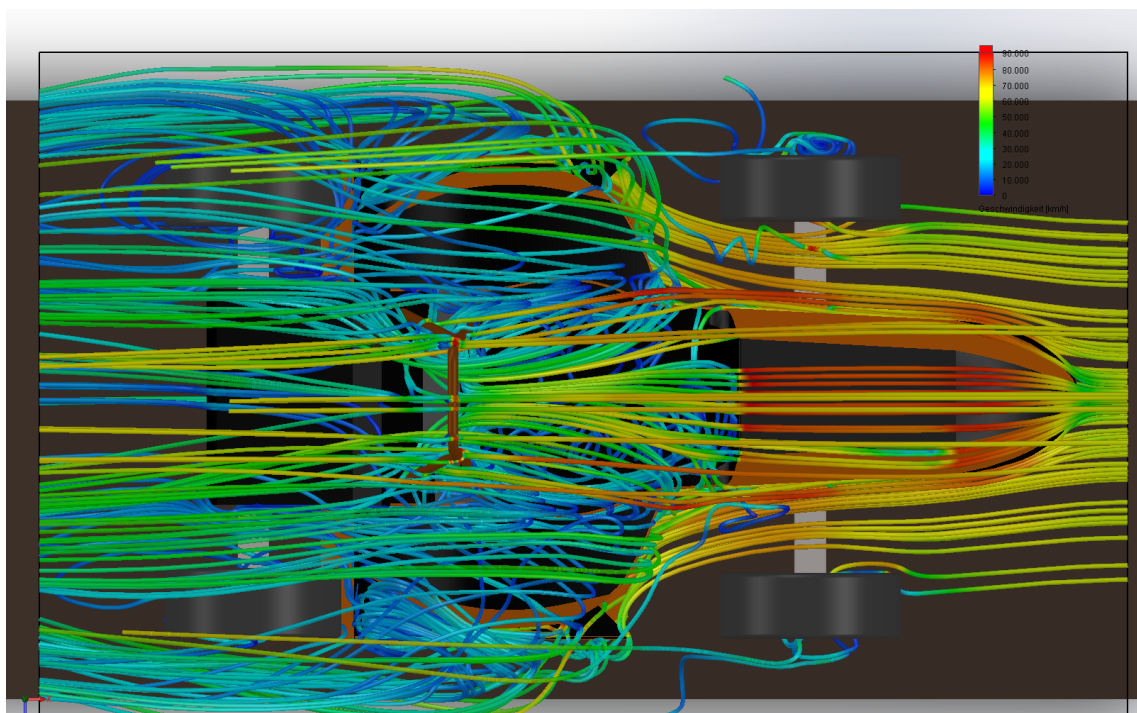


Abbildung B.2: Car-Orange

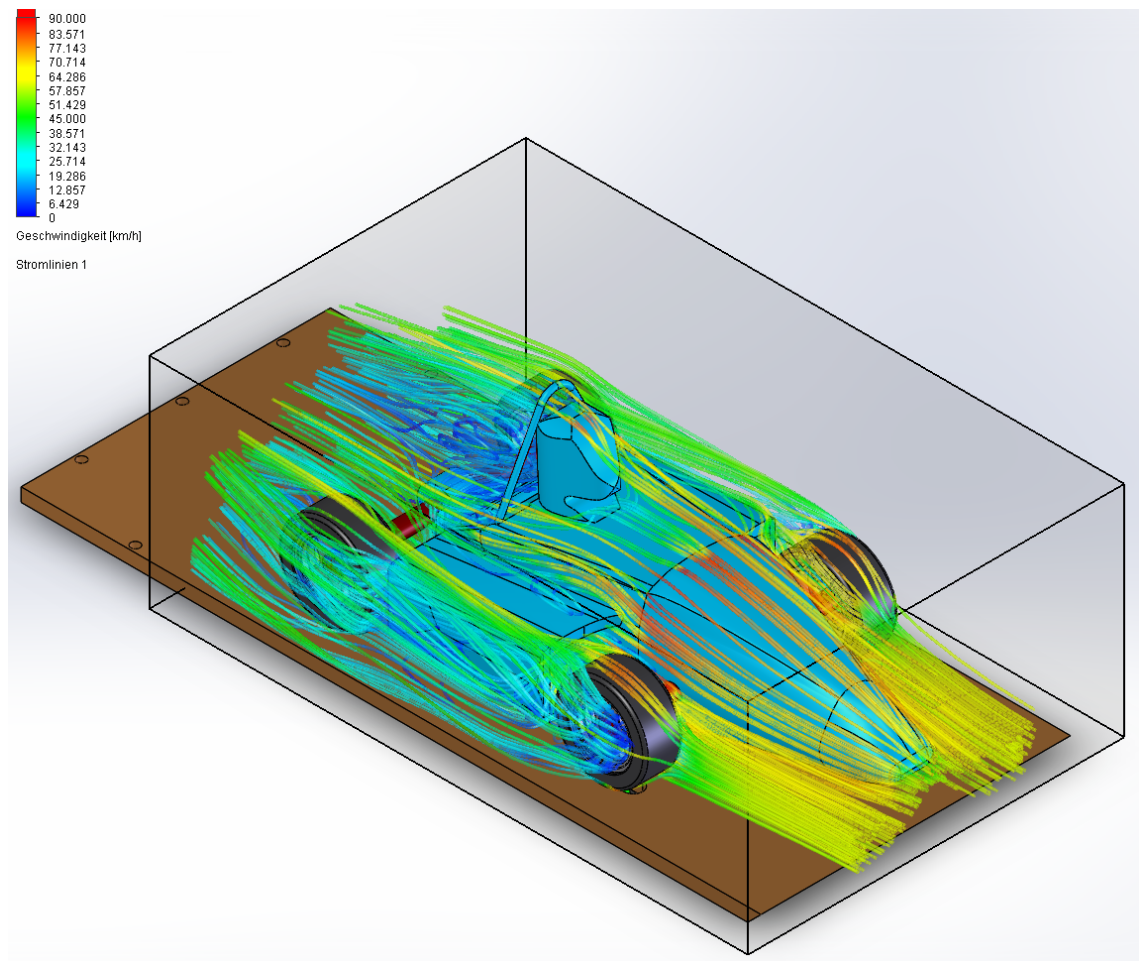


Abbildung B.3: Car-Referenz

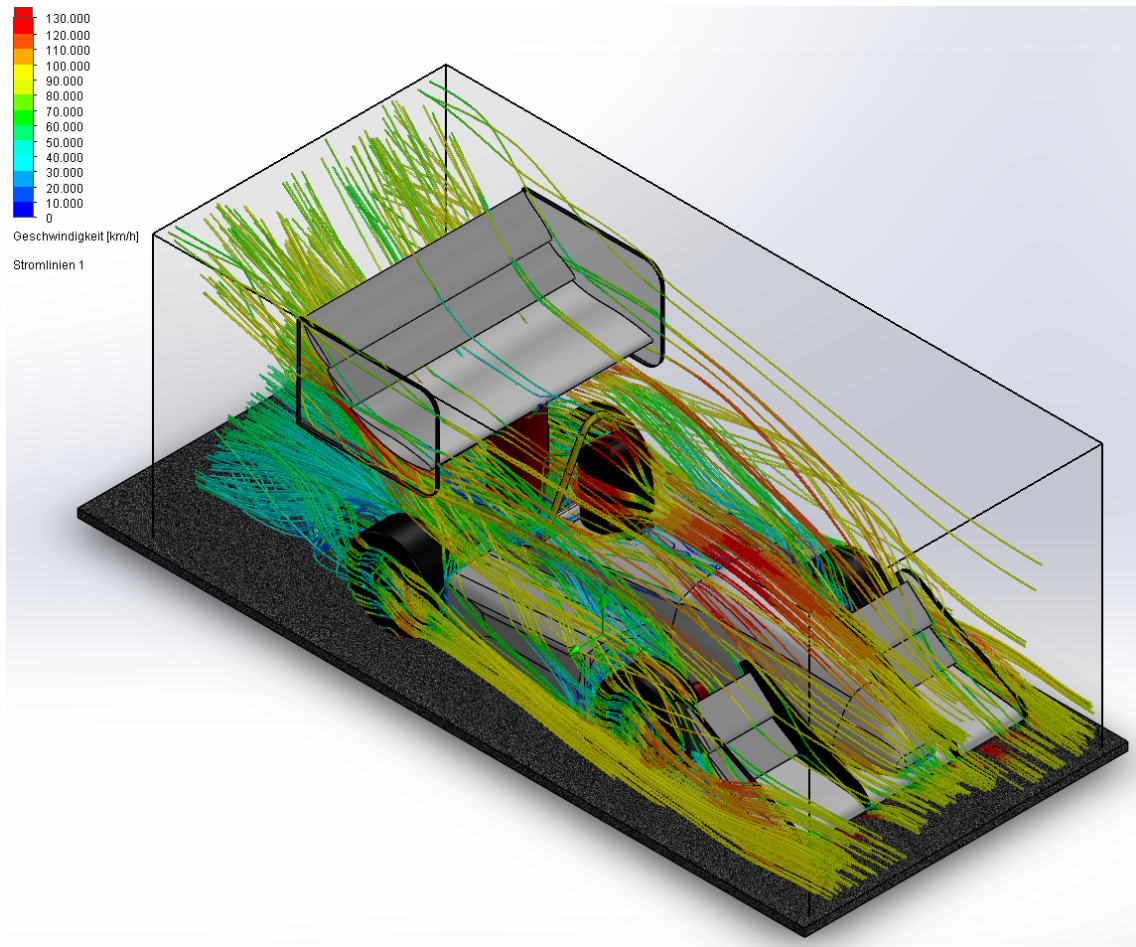


Abbildung B.4: Car-Vollausstattung

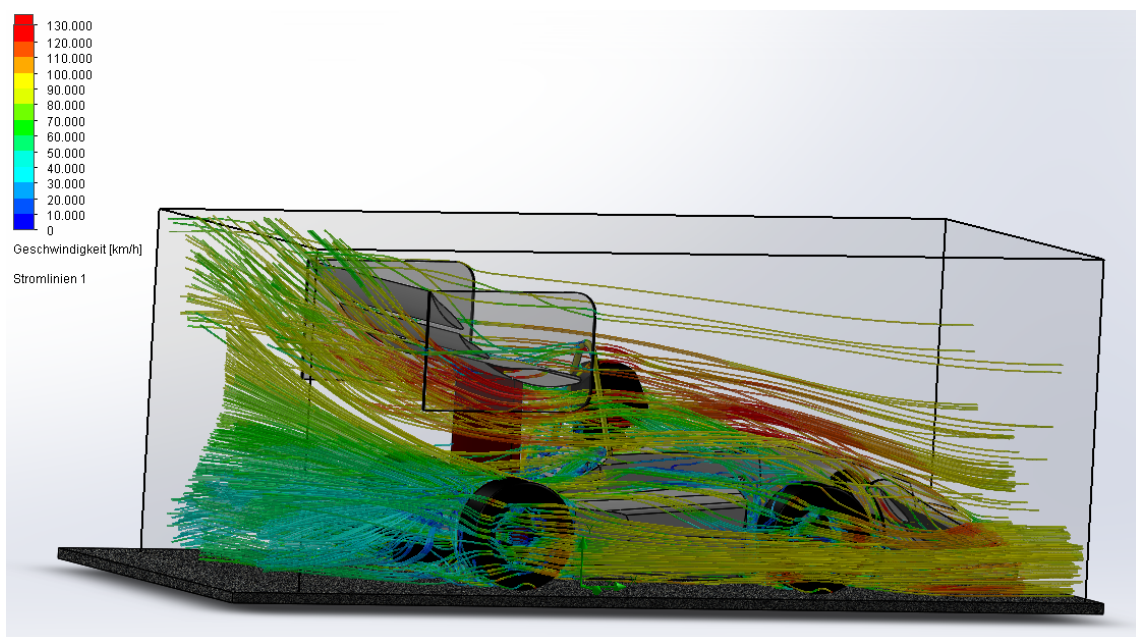


Abbildung B.5: Car-Vollausstattung



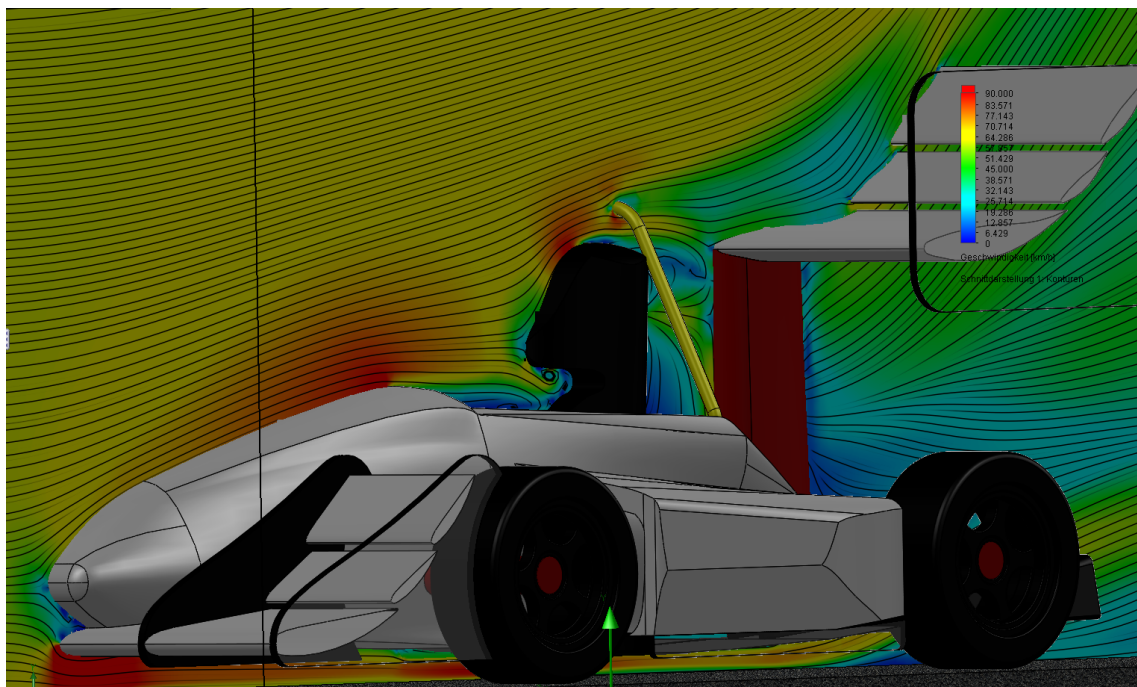


Abbildung B.6: Car-Vollausstattung

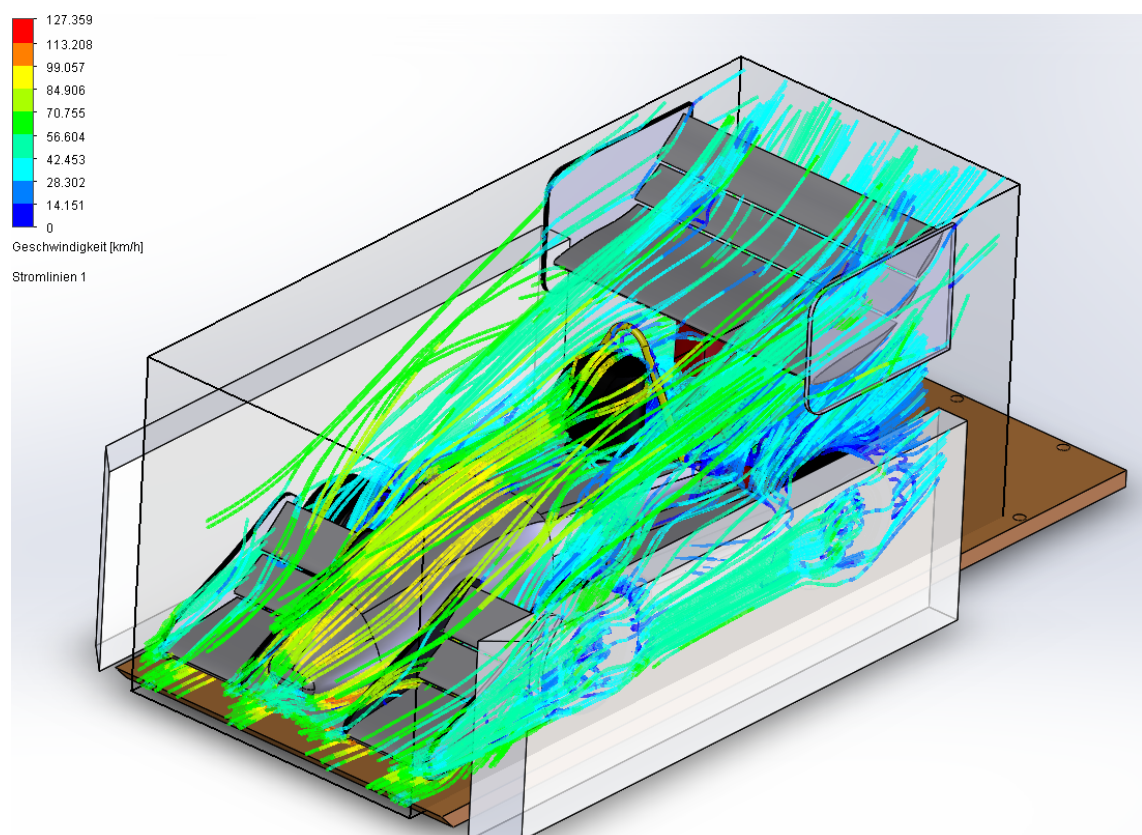


Abbildung B.7: Car-Vollausstattung

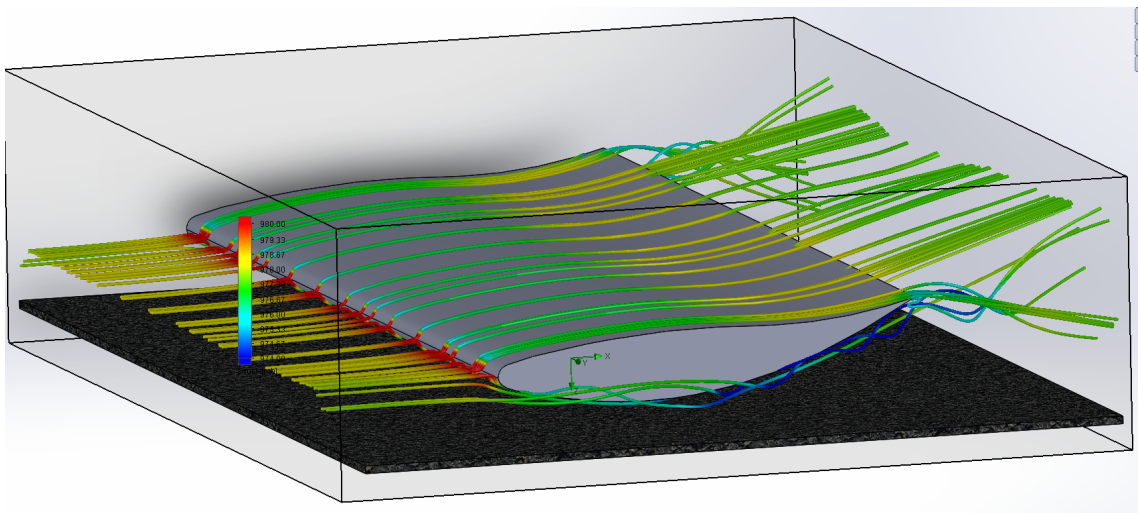


Abbildung B.8: Flügelprofil



## **Anhang C: Simulationsergebnisse**

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Orange

Geschwindigkeit: 30km/h

Iterationen: 738

CPU-Zeit: 315798 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	11:35:47 , Sep 10
Vernetzung normal beendet	11:42:11 , Sep 10
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	11:42:12 , Sep 10
Berechnung gestartet 0	11:42:56 , Sep 10
Netzverfeinerung 352	13:30:44 , Sep 10
Netzverfeinerung 661	21:46:46 , Sep 10
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 705	18:13:10 , Sep 12
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 723	12:52:22 , Sep 13
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 737	03:27:05 , Sep 14
Ziele sind konvergiert 737	
Berechnung beendet 738	04:14:33 , Sep 14

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	42
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	15
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	28

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	6847365
Fluidzellen	4420626
Festkörperzellen	1205100
Partielle Zellen	1221639
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	1172

Maximale Verfeinerungsstufe: 5

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstands kraft (X) 1	N	-0.140	100	Ein	0.00099346 4596	0.01265576 42

Auftriebskraft (Y) 1	N	0.064	100	Ein	0.00274065891	0.00446667044
Ca		0.4549254	100	Ein	0.019561155	0.0318803747
Cw		-1.0020794	100	Ein	0.00709074557	0.0903291412

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	964.85	995.52
Temperatur [°C]	21.93	22.10
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.14	1.17
Geschwindigkeit [km/h]	0	52.279
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-51.170	46.734
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-37.629	41.059
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-43.164	42.488
Temperatur (Fluid) [°C]	21.93	22.10
Machzahl [ ]	0	0.04
Wirbelstärke [1/s]	0.081	186748.128
Scherspannung [mb]	0	0.22
Relativer Druck [mb]	-12.55	18.12
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Orange

Geschwindigkeit: 60km/h

Iterationen: 738

CPU-Zeit: 300299 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	11:14:51 , Sep 10
Vernetzung normal beendet	11:21:15 , Sep 10
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	11:21:16 , Sep 10
Berechnung gestartet 0	11:22:01 , Sep 10
Netzverfeinerung 352	13:11:06 , Sep 10
Netzverfeinerung 661	21:27:27 , Sep 10
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 709	18:26:05 , Sep 12
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 727	11:59:13 , Sep 13
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 737	22:48:16 , Sep 13
Ziele sind konvergiert 737	
Berechnung beendet 738	23:34:50 , Sep 13

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	42
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	15
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	28

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	6858530
Fluidzellen	4352172
Festkörperzellen	1262516
Partielle Zellen	1243842
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	1780

Maximale Verfeinerungsstufe: 5

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-0.560	100	Ein	0.00358541026	0.0518576

						287
Auftriebskraft (Y) 1	N	0.112	100	Ein	0.0161355356	0.0200340112
Ca		0.1990320	100	Ein	0.0287910624	0.0357472153
Cw		-0.9994992	100	Ein	0.00639754222	0.0925309366

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	935.44	1017.36
Temperatur [°C]	-146.39	22.37
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.11	1.38
Geschwindigkeit [km/h]	0	160.271
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-110.866	97.573
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-155.013	79.521
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-85.148	87.192
Temperatur (Fluid) [°C]	-146.39	22.37
Machzahl [ ]	0	0.13
Wirbelstärke [1/s]	0.415	402542.684
Scherspannung [mb]	0	1.85
Relativer Druck [mb]	-41.96	39.96
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Orange

Geschwindigkeit: 90km/h

Iterationen: 716

CPU-Zeit: 258833 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	11:19:36 , Sep 10
Vernetzung normal beendet	11:26:07 , Sep 10
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	11:26:08 , Sep 10
Berechnung gestartet 0	11:26:53 , Sep 10
Netzverfeinerung 352	13:37:45 , Sep 10
Netzverfeinerung 658	22:56:10 , Sep 10
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 701	17:58:13 , Sep 12
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 716	11:43:39 , Sep 13
Strömungsfeld auf Benutzerwunsch gespeichert 761	13:33:38 , Sep 15

Warnungen: Die Strömung hat eine hohe Machzahl; die Option "Strömung mit hoher Machzahl" wird empfohlen. Maximale Machzahl=8.30723;  $dV/V=2.26302e-010$

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	42
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	15
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	28

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	6845902
Fluidzellen	4357579
Festkörperzellen	1255615
Partielle Zellen	1232708
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	2064

Maximale Verfeinerungsstufe: 0

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
------	---------	------	---------	-------------------------	-------	-----------

Widerstandskraft (X) 1	N	-1.240	100	Ein	0.0108088232	0.0920264083
Auftriebskraft (Y) 1	N	0.146	82	Ein	0.0662866629	0.0546176082
Ca		0.1156257	82	Ein	0.0525677852	0.0433137915
Cw		-0.9837167	100	Ein	0.00857179817	0.0729803591

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	680.99	1331.22
Temperatur [°C]	-267.93	880.28
Density (Fluid) [kg/m^3]	0.15	14.27
Geschwindigkeit [km/h]	0	1673.393
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-547.903	593.974
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-502.639	1581.127
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-131.112	137.269
Temperatur (Fluid) [°C]	-267.93	880.28
Machzahl [ ]	0	1.41
Wirbelstärke [1/s]	0.156	9953886.043
Scherspannung [mb]	0	31.91
Relativer Druck [mb]	-296.41	353.82
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Referenz

Geschwindigkeit: 30km/h

Iterationen: 308

CPU-Zeit: 7802 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	14:27:04 , Sep 09
Vernetzung normal beendet	14:29:58 , Sep 09
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	14:29:59 , Sep 09
Berechnung gestartet 0	14:30:57 , Sep 09
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 307	16:40:12 , Sep 09
Ziele sind konvergiert 307	
Berechnung beendet 308	16:42:35 , Sep 09

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	40
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	16
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	28

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	937146
Fluidzellen	505649
Festkörperzellen	184320
Partielle Zellen	247177
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 5

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-0.111	100	Ein	0.00144957977	0.00891959048
Abtriebskraft (Y) 1	N	0.070	100	Ein	0.00193662566	0.00200276343
Abtriebsbewert		0.4622275	100	Ein	0.0128511475	0.0132900



						275
Widerstands beiwert		-0.7338205	100	Ein	0.00961918 648	0.059 1890 189

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	974.92	983.18
Temperatur [°C]	21.83	22.09
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.15	1.16
Geschwindigkeit [km/h]	0	50.730
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-49.745	29.891
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-26.844	36.281
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-39.740	41.039
Temperatur (Fluid) [°C]	21.83	22.09
Machzahl [ ]	0	0.04
Wirbelstärke [1/s]	0.003	80437.724
Scherspannung [mb]	0	0.22
Relativer Druck [mb]	-2.48	5.78
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Referenz

Geschwindigkeit: 60km/h

Iterationen: 202

CPU-Zeit: 5219 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	14:15:42 , Sep 09
Vernetzung normal beendet	14:18:35 , Sep 09
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	14:18:36 , Sep 09
Berechnung gestartet 0	14:19:34 , Sep 09
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 201	15:45:46 , Sep 09
Ziele sind konvergiert 201	
Berechnung beendet 202	15:48:10 , Sep 09

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	40
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	16
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	28

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	937174
Fluidzellen	505649
Festkörperzellen	184332
Partielle Zellen	247193
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 5

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-0.435	100	Ein	0.0193908586	0.0361235774
Abtriebskraft (Y) 1	N	0.267	100	Ein	0.00742122905	0.00743993193
Abtriebsbewert		0.4429991	100	Ein	0.0123113835	0.0123424

						105
Widerstands beiwert		-0.7209999	100	Ein	0.03216829 65	0.059 9268 95

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	973.14	991.89
Temperatur [°C]	21.63	22.37
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.15	1.17
Geschwindigkeit [km/h]	0	106.396
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-104.645	62.459
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-53.974	74.156
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-79.336	82.237
Temperatur (Fluid) [°C]	21.63	22.37
Machzahl [ ]	0	0.09
Wirbelstärke [1/s]	0.010	215600.564
Scherspannung [mb]	0	3.25
Relativer Druck [mb]	-4.26	14.49
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Referenz

Geschwindigkeit: 90km/h

Iterationen: 287

CPU-Zeit: 7258 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	14:21:07 , Sep 09
Vernetzung normal beendet	14:24:00 , Sep 09
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	14:24:02 , Sep 09
Berechnung gestartet 0	14:25:00 , Sep 09
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 286	16:25:10 , Sep 09
Ziele sind konvergiert 286	
Berechnung beendet 287	16:27:33 , Sep 09

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	40
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	16
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	28

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	937146
Fluidzellen	505649
Festkörperzellen	184320
Partielle Zellen	247177
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 5

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-0.961	100	Ein	0.0103314062	0.0689930365
Abtriebskraft (Y) 1	N	0.594	100	Ein	0.0188782603	0.0192189573
Abtriebsbewert		0.4383256	100	Ein	0.0139191339	0.0141703

						333
Widerstands beiwert		-0.7082194	100	Ein	0.00761745 119	0.050 8692 696

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	967.75	992.26
Temperatur [°C]	21.14	22.80
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.14	1.17
Geschwindigkeit [km/h]	0	162.170
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-159.495	93.151
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-81.077	113.452
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-119.945	124.402
Temperatur (Fluid) [°C]	21.14	22.80
Machzahl [ ]	0	0.13
Wirbelstärke [1/s]	0.009	241502.830
Scherspannung [mb]	0	3.69
Relativer Druck [mb]	-9.65	14.86
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Diffusor

Geschwindigkeit: 30km/h

Iterationen: 330

CPU-Zeit: 39466 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	15:56:05 , Sep 09
Vernetzung normal beendet	16:09:05 , Sep 09
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	16:09:09 , Sep 09
Berechnung gestartet 0	16:13:55 , Sep 09
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 329	03:07:36 , Sep 10
Ziele sind konvergiert 329	
Berechnung beendet 330	03:19:45 , Sep 10

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	115
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	57
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	100

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	3699968
Fluidzellen	1875464
Festkörperzellen	923468
Partielle Zellen	901036
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	5

Maximale Verfeinerungsstufe: 4

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	0.062	100	Ein	0.00576981213	0.00622921694
Widerstandskraft (X) 2	N	-0.129	100	Ein	0.00275064386	0.00790267246
Widerstandsbeiwert		-0.8245410	100	Ein	0.0175416962	0.0503977

						564
Auftriebsbeiwert		0.3946752	100	Ein	0.0367958545	0.0397256193

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	970.81	985.78
Temperatur [°C]	21.92	22.20
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.15	1.16
Geschwindigkeit [km/h]	0	61.426
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-52.173	32.421
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-33.032	61.253
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-44.398	38.933
Temperatur (Fluid) [°C]	21.92	22.20
Machzahl [ ]	0	0.05
Wirbelstärke [1/s]	0.001	167840.302
Scherspannung [mb]	0	0.36
Relativer Druck [mb]	-6.59	8.38
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Diffusor

Geschwindigkeit: 60km/h

Iterationen: 362

CPU-Zeit: 40071 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	11:38:54 , Sep 09
Vernetzung normal beendet	11:51:34 , Sep 09
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	11:51:39 , Sep 09
Berechnung gestartet 0	11:56:15 , Sep 09
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 361	23:00:09 , Sep 09
Ziele sind konvergiert 361	
Berechnung beendet 362	23:11:04 , Sep 09

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	115
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	57
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	100

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	3699975
Fluidzellen	1875464
Festkörperzellen	923475
Partielle Zellen	901036
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	5

Maximale Verfeinerungsstufe: 4

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	0.145	100	Ein	0.0231304268	0.0231484817
Widerstandskraft (X) 2	N	-0.502	100	Ein	0.00702343531	0.0320060008
Widerstandsbeiwert		-0.7998377	100	Ein	0.0111975137	0.0510273



						987
Auftriebsbeiwert		0.2315950	100	Ein	0.0368770069	0.0369057919

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	964.60	1000.10
Temperatur [°C]	21.47	23.66
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.14	1.18
Geschwindigkeit [km/h]	0	197.494
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-107.693	68.659
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-69.769	197.318
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-92.357	80.925
Temperatur (Fluid) [°C]	21.47	23.66
Machzahl [ ]	0	0.16
Wirbelstärke [1/s]	8.604e-005	397173.191
Scherspannung [mb]	0	0.82
Relativer Druck [mb]	-12.80	22.70
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Diffusor

Geschwindigkeit: 90km/h

Iterationen: 330

CPU-Zeit: 35246 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	11:50:18 , Sep 09
Vernetzung normal beendet	12:02:56 , Sep 09
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	12:02:58 , Sep 09
Berechnung gestartet 0	12:07:34 , Sep 09
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 329	21:51:02 , Sep 09
Ziele sind konvergiert 329	
Berechnung beendet 330	22:04:07 , Sep 09

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	115
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	57
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	100

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	3699968
Fluidzellen	1875464
Festkörperzellen	923468
Partielle Zellen	901036
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	5

Maximale Verfeinerungsstufe: 4

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	0.315	100	Ein	0.0391563652	0.0425037199
Widerstandskraft (X) 2	N	-1.113	100	Ein	0.0204974056	0.0547120258
Widerstandsbeiwert		-0.7887629	100	Ein	0.0145241301	0.0387680

						567
Auftriebsbeiwert		0.2232052	100	Ein	0.0277455672	0.0301174486

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	943.63	1026.30
Temperatur [°C]	19.25	22.92
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.11	1.21
Geschwindigkeit [km/h]	0	165.941
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-162.764	103.834
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-105.301	125.333
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-139.721	121.530
Temperatur (Fluid) [°C]	19.25	22.92
Machzahl [ ]	0	0.13
Wirbelstärke [1/s]	1.615e-006	612926.636
Scherspannung [mb]	0	1.21
Relativer Druck [mb]	-33.77	48.90
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Vollausstattung

Geschwindigkeit: 30km/h

Iterationen: 202

CPU-Zeit: 6180 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	14:58:49 , Sep 10
Vernetzung normal beendet	15:04:44 , Sep 10
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	15:04:45 , Sep 10
Berechnung gestartet 0	15:06:01 , Sep 10
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 201	16:47:58 , Sep 10
Ziele sind konvergiert 201	
Berechnung beendet 202	16:50:42 , Sep 10

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	36
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	16
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	16

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	1022704
Fluidzellen	481288
Festkörperzellen	245508
Partielle Zellen	295908
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 6

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	-0.366	100	Ein	0.00642995147	0.00968233157
Widerstandskraft (X) 2	N	-0.284	100	Ein	0.00247862175	0.013731788
Widerstandsbeiwert		-1.1613870	100	Ein	0.0101259023	0.0560984

						119
Auftriebsbeiwert		-1.4968660	100	Ein	0.0262682519	0.0395551858

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	962.65	1049.20
Temperatur [°C]	21.88	22.05
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.14	1.24
Geschwindigkeit [km/h]	0	63.410
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-61.422	22.697
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-48.139	50.218
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-43.496	43.008
Temperatur (Fluid) [°C]	21.88	22.05
Machzahl [ ]	0	0.05
Wirbelstärke [1/s]	0.189	166307.898
Scherspannung [mb]	0	0.78
Relativer Druck [mb]	-14.75	71.80
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Vollausstattung

Geschwindigkeit: 60km/h

Iterationen: 202

CPU-Zeit: 6656 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	14:47:11 , Sep 10
Vernetzung normal beendet	14:53:09 , Sep 10
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	14:53:10 , Sep 10
Berechnung gestartet 0	14:54:29 , Sep 10
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 201	16:44:21 , Sep 10
Ziele sind konvergiert 201	
Berechnung beendet 202	16:47:02 , Sep 10

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	36
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	16
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	16

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	1022704
Fluidzellen	481288
Festkörperzellen	245508
Partielle Zellen	295908
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 6

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	-1.589	100	Ein	0.0388146075	0.038928449
Widerstandskraft (X) 2	N	-1.123	100	Ein	0.0120976179	0.056171567
Widerstandsbeiwert		-1.1469870	100	Ein	0.0123554378	0.0573686

						743
Auftriebsbeiwert		-1.6233375	100	Ein	0.0396418098	0.0397580775

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	949.93	1151.23
Temperatur [°C]	21.52	22.21
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.12	1.36
Geschwindigkeit [km/h]	0	127.359
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-123.072	41.367
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-97.613	101.739
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-96.173	94.991
Temperatur (Fluid) [°C]	21.52	22.21
Machzahl [ ]	0	0.10
Wirbelstärke [1/s]	0.396	664178.643
Scherspannung [mb]	0	3.15
Relativer Druck [mb]	-27.47	173.83
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Vollausstattung

Geschwindigkeit: 90km/h

Iterationen: 223

CPU-Zeit: 6844 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	14:54:08 , Sep 10
Vernetzung normal beendet	15:00:04 , Sep 10
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	15:00:06 , Sep 10
Berechnung gestartet 0	15:01:21 , Sep 10
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 222	16:54:24 , Sep 10
Ziele sind konvergiert 222	
Berechnung beendet 223	16:57:08 , Sep 10

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	36
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	16
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	16

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	1022704
Fluidzellen	481288
Festkörperzellen	245508
Partielle Zellen	295908
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 6

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	-3.679	100	Ein	0.0983339691	0.100557358
Widerstandskraft (X) 2	N	-2.523	100	Ein	0.0248848325	0.124439295
Widerstandsbeiwert		-1.1454396	100	Ein	0.0112956757	0.0564852



						474
Auftriebsbeiwert		-1.6699763	100	Ein	0.0446355678	0.0456448044

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	912.09	1227.95
Temperatur [°C]	20.90	22.45
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.08	1.45
Geschwindigkeit [km/h]	0	191.843
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-185.501	68.992
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-146.738	152.098
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-149.031	147.540
Temperatur (Fluid) [°C]	20.90	22.45
Machzahl [ ]	0	0.16
Wirbelstärke [1/s]	0.363	1144209.982
Scherspannung [mb]	0	6.13
Relativer Druck [mb]	-65.31	250.55
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Originalgröße

Geschwindigkeit: 30km/h

Iterationen: 93

CPU-Zeit: 507187 s

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	74
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	32
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	34

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	7702371
Fluidzellen	3813598
Festkörperzellen	1916679
Partielle Zellen	1972094
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 6

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-56.481	0	Ein	3293.11551	0
Abtriebskraft (Y) 1	N	-103.268	0	Ein	6021.91806	0
Ca		-1.7664067	0	Ein	103.005366	0
Cw		-0.9661131	0	Ein	56.3289911	0

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	973.69	1075.45
Temperatur [°C]	21.78	22.16
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.15	1.27
Geschwindigkeit [km/h]	0	65.606
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-60.943	49.640
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-57.556	45.998
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-49.974	47.637
Temperatur (Fluid) [°C]	21.78	22.16
Machzahl [ ]	0	0.05

Wirbelstärke [1/s]	0.003	36665.105
Scherspannung [mb]	0	0.18
Relativer Druck [mb]	-3.71	98.05
Wärmeübergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Originalgröße

Geschwindigkeit: 60km/h

Iterationen: 51

CPU-Zeit: 271496 s

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	74
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	32
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	34

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	7702371
Fluidzellen	3813598
Festkörperzellen	1916679
Partielle Zellen	1972094
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 0

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-249.947	0	Ein	12185.6526	0
Abtriebskraft (Y) 1	N	-512.082	0	Ein	15875.4273	0
Ca		-2.1897761	0	Ein	67.8867831	0
Cw		-1.0688290	0	Ein	52.1085031	0

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	948.87	1309.15
Temperatur [°C]	17.24	22.36
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.12	1.55
Geschwindigkeit [km/h]	0	228.737
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-227.724	163.105
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-111.756	96.558
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-112.680	108.605
Temperatur (Fluid) [°C]	17.24	22.36
Machzahl [ ]	0	0.19

Wirbelstärke [1/s]	0.007	195316.462
Scherspannung [mb]	0	0.79
Relativer Druck [mb]	-28.53	331.75
Wärmeübergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Car-Originalgröße

Geschwindigkeit: 90km/h

Iterationen: 48

CPU-Zeit: 227940 s

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	74
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	32
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	34

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	7702315
Fluidzellen	3813598
Festkörperzellen	1916649
Partielle Zellen	1972068
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 6

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Widerstandskraft (X) 1	N	-568.244	0	Ein	17706.5905	0
Abtriebskraft (Y) 1	N	-1184.835	0	Ein	20692.0794	0
Ca		-2.2518375	0	Ein	39.3263066	0
Cw		-1.0799762	0	Ein	33.6522392	0

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	696.13	1665.15
Temperatur [°C]	-242.52	24.62
Density (Fluid) [kg/m^3]	0.03	3.90
Geschwindigkeit [km/h]	0	1237.640
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-1230.185	423.265
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-211.361	283.163
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-433.577	403.760
Temperatur (Fluid) [°C]	-242.52	24.62

Machzahl [ ]	0	1.31
Wirbelstärke [1/s]	0.023	406221.510
Scherspannung [mb]	0	1.59
Relativer Druck [mb]	-281.27	687.75
Wärmeübergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Sim-Diffusor

Geschwindigkeit: 30km/h

Iterationen: 206

CPU-Zeit: 3326 s

### Protokoll

Daten werden zur Berechnung vorbereitet	16:03:07 , Sep 05
Berechnung beendet 204	16:03:19 , Sep 05

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	116
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	32
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	56

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	676312
Fluidzellen	399149
Festkörperzellen	140763
Partielle Zellen	136400
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 4

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	-0.097	100	Ein	0.00608425453	0.00642249704
Widerstandskraft (X) 2	N	-0.023	100	Ein	0.000764939872	0.00124445011
Widerstandsbeiwert		-0.0557076	100	Ein	0.00184825368	0.00300685006
Auftriebsbeiwert		-0.2352944	100	Ein	0.0147008232	0.0155180874



**Min/Max-Tabelle**

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	969.17	983.58
Temperatur [°C]	21.96	22.04
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.14	1.16
Geschwindigkeit [km/h]	0	39.788
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-39.785	11.357
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-25.320	26.038
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-26.832	24.397
Temperatur (Fluid) [°C]	21.96	22.04
Machzahl [ ]	0	0.03
Wirbelstärke [1/s]	0.186	152257.446
Scherspannung [mb]	0	0.12
Relativer Druck [mb]	-8.23	6.18
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Sim-Diffusor

Geschwindigkeit: 60km/h

Iterationen: 177

CPU-Zeit: 2828 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	13:18:22 , Sep 04
Vernetzung normal beendet	13:20:02 , Sep 04
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	13:20:02 , Sep 04
Berechnung gestartet 0	13:20:39 , Sep 04
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 176	14:07:16 , Sep 04
Ziele sind konvergiert 176	
Berechnung beendet 177	14:08:50 , Sep 04

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	116
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	32
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	56

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	676312
Fluidzellen	399149
Festkörperzellen	140763
Partielle Zellen	136400
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 4

### Ziele

Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	-0.495	100	Ein	0.018939955	0.0210123513
Widerstandskraft (X) 2	N	-0.090	100	Ein	0.00321230067	0.00353442459
Widerstandsbeiwert		-0.0241328	100	Ein	0.000862391535	0.0009488

						7065 7
Auftriebsbeiwert		-0.1328232	100	Ein	0.00508472 231	0.005 6410 8899

### Min/Max-Tabelle

Name	Min.	Max.
Druck [mb]	958.39	992.76
Temperatur [°C]	21.83	22.15
Density (Fluid) [kg/m^3]	1.13	1.17
Geschwindigkeit [km/h]	0	81.389
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-81.315	20.240
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-55.563	52.350
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-54.267	50.849
Temperatur (Fluid) [°C]	21.83	22.15
Machzahl [ ]	0	0.07
Wirbelstärke [1/s]	0.354	232047.613
Scherspannung [mb]	0	0.23
Relativer Druck [mb]	-19.01	15.36
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## ERGEBNISSE

### Allgemeine Informationen

Konfiguration: Sim-Diffusor

Geschwindigkeit: 90km/h

Iterationen: 188

CPU-Zeit: 2870 s

### Protokoll

Vernetzung gestartet	13:46:47 , Sep 05
Vernetzung normal beendet	13:48:27 , Sep 05
Daten werden zur Berechnung vorbereitet	13:48:27 , Sep 05
Berechnung gestartet 0	13:49:04 , Sep 05
Die Berechnung ist konvergiert, da die folgenden Kriterien erfüllt sind: 187	14:36:24 , Sep 05
Ziele sind konvergiert 187	
Berechnung beendet 188	14:37:57 , Sep 05

### Berechnungsnetz

#### Abmessungen des Basisnetzes

Anzahl der Zellen in X-Richtung	116
Anzahl der Zellen in Y-Richtung	32
Anzahl der Zellen in Z-Richtung	56

#### Anzahl der Zellen

Zellen insgesamt	676312
Fluidzellen	399149
Festkörperzellen	140763
Partielle Zellen	136400
Unregelmäßige Zellen	0
Getrimmte Zellen	0

Maximale Verfeinerungsstufe: 4

### Ziele

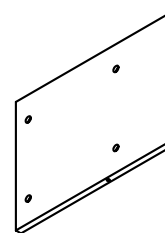
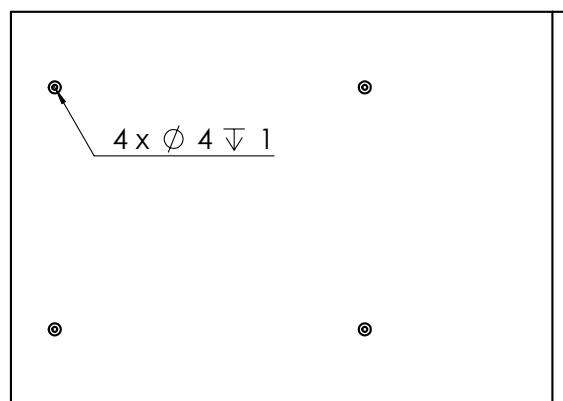
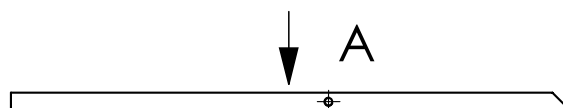
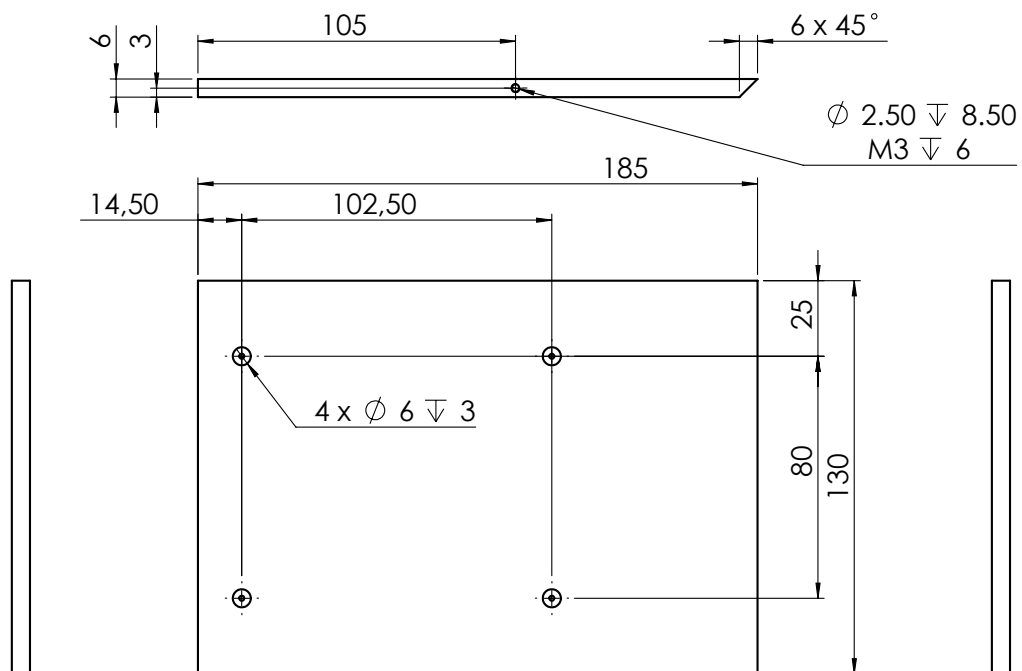
Name	Einheit	Wert	Verlauf	In Konvergenz verwenden	Delta	Kriterien
Auftriebskraft (Y) 1	N	-1.188	100	Ein	0.0206368518	0.0378990891
Widerstandskraft (X) 2	N	-0.199	100	Ein	0.00683577572	0.00720878459
Widerstandsbeiwert		-0.0535011	100	Ein	0.00183516916	0.0019353

						0913
Auftriebsbeiwert		-0.3188226	100	Ein	0.00554028036	0.0101745935

### Min/Max-Tabelle


Name	Min.	Max.
Druck [mb]	847.40	1230.21
Temperatur [°C]	-273.15	22.36
Density (Fluid) [kg/m^3]	0.07	104866.60
Geschwindigkeit [km/h]	0	430.125
Geschwindigkeit (X) [km/h]	-123.754	209.980
Geschwindigkeit (Y) [km/h]	-429.517	378.361
Geschwindigkeit (Z) [km/h]	-81.677	79.653
Temperatur (Fluid) [°C]	-273.15	22.36
Machzahl [ ]	0	0.57
Wirbelstärke [1/s]	0.058	392553.769
Scherspannung [mb]	0	17.80
Relativer Druck [mb]	-130.00	252.81
Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]	0	0
Oberflächenwärmestromdichte [W/m^2]	0	0

## **Anhang D: Zeichnungen der Vorrichtung**

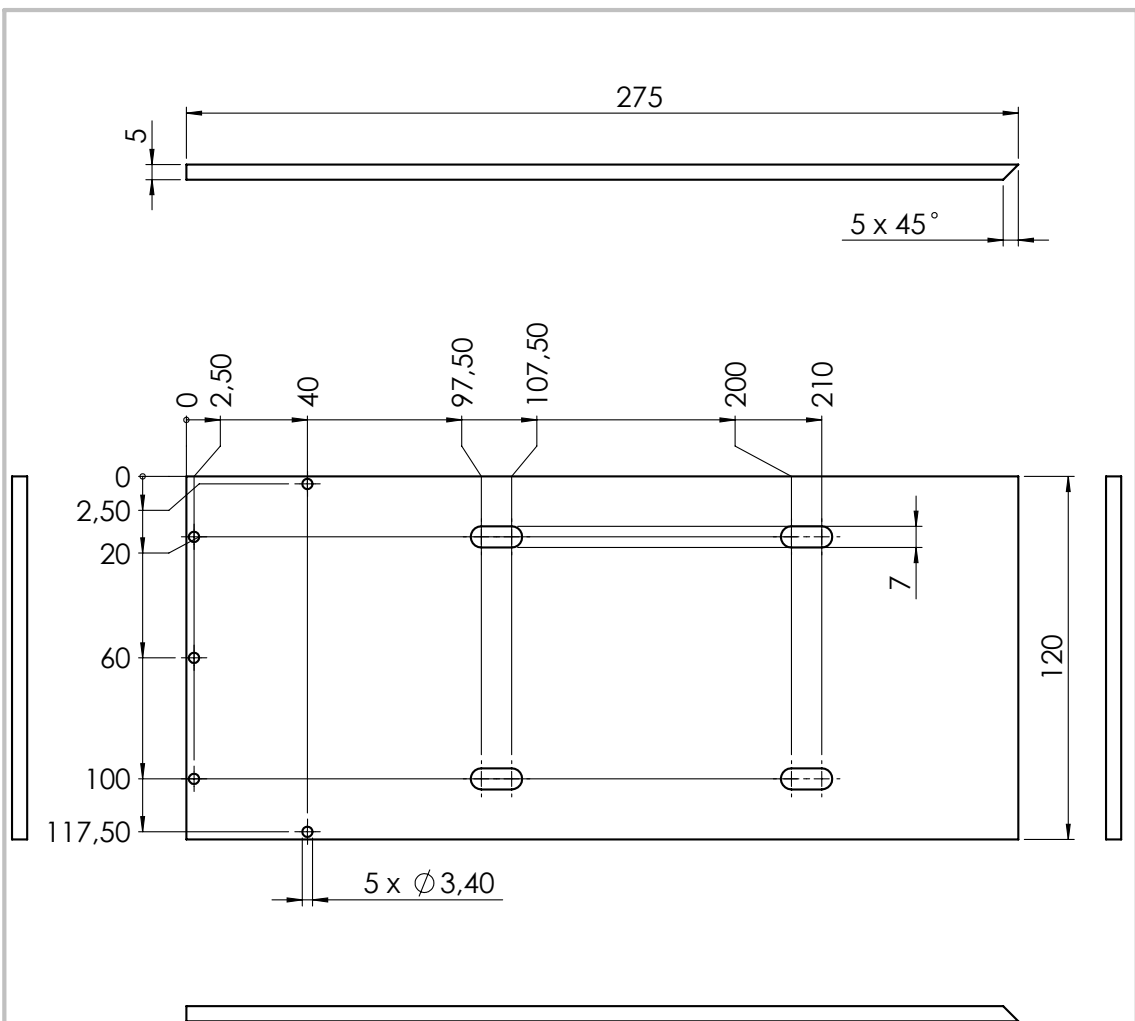


Benötigte Stückzahl: 1


A

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:2 (1:5)		(Gewicht)		
				Klasse DIN ISO 2768				(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)		PVC		
0	Erstausgabe	00.00.00			Datum	Name		Vorrichtung-Platte-01				
				Bearb.	00.00.00	Name						
				Gepr.								
				Norm								
				Hochschule 				01-02-01			Blatt	
				Mittweida							X	
Rev.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.			Ersatz für:	Ersatz durch:			Blätter X

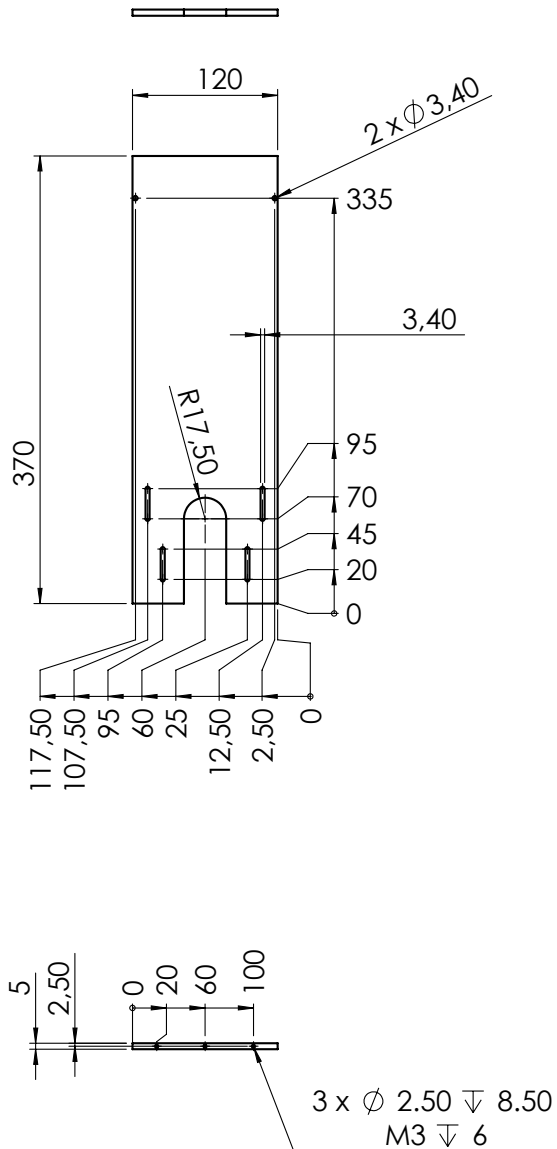
Blatt X  
Blätter X



Benötigte Stückzahl: 1

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)	
								(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)		PVC oder Al	
0	Erstausgabe	00.00.00		Datum	Name		Horizontale Platte				
			Bearb.	00.00.00	Name						
			Gepr.								
			Norm								
							01-02-02				
				Hochschule Mittweida				Blatt		X	
								Blätter		X	
Rev.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.		Ersatz für:		Ersatz durch:		

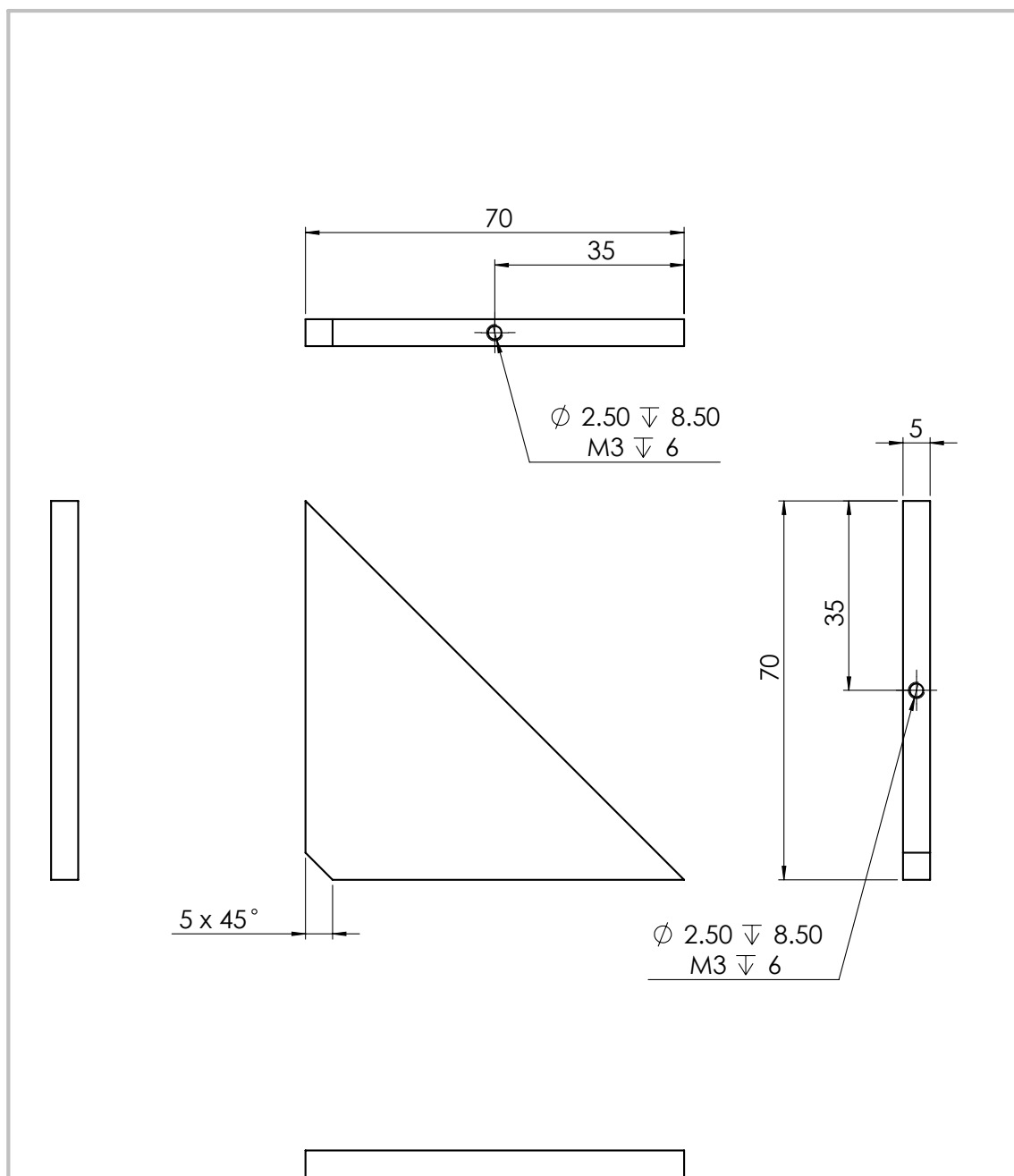




Benötigte Stückzahl: 1

(Verwendungsbereich)			(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768		(Oberfl.)	Maßstab 1:5	(Gewicht)
						(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)	Al
0	Erstausgabe	00.00.00		Datum	Name	Vertikale Platte	
			Bearb.	00.00.00	Name		
			Gepr.				
			Norm				
			Hochschule Mittweida			01-02-03	
Rev.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.	Ersatz für:	Ersatz durch:

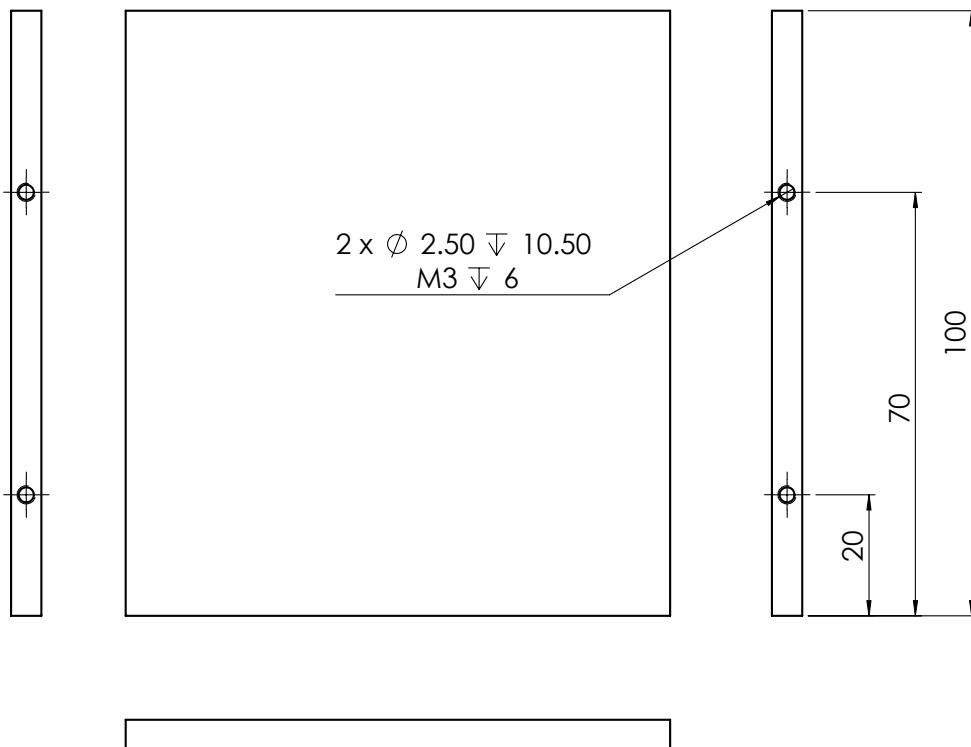
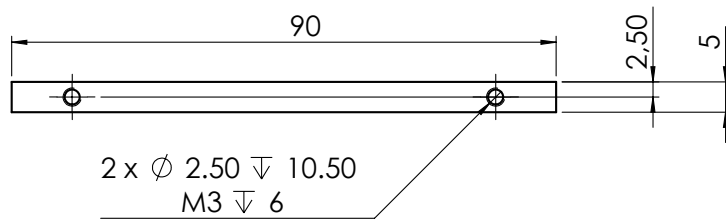
Blatt X  
Blätter X




Benötigte Stückzahl: 2

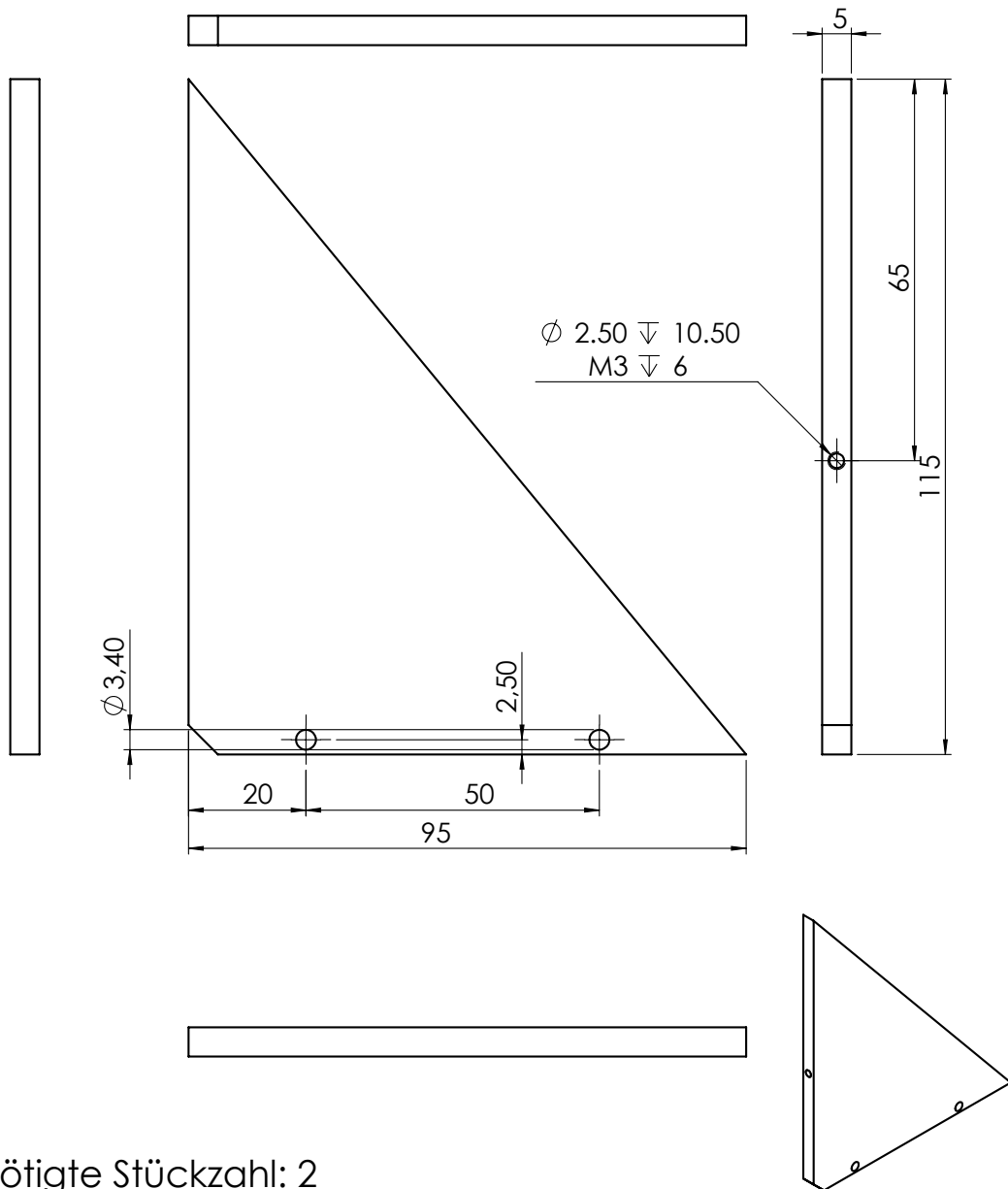
(Verwendungsbereich)			(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768		(Oberfl.)	Maßstab 1:1	(Gewicht)
						(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)	AL
0	Erstausgabe	00.00.00		Datum	Name	Winkel-oben	
			Bearb.	00.00.00	Name		
			Gepr.				
			Norm				
			Hochschule Mittweida			01-02-04	
Rev.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.	Ersatz für:	Ersatz durch:

Blatt X  
Blätter X



Benötigte Stückzahl:

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.)  Klasse DIN ISO 2768		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)		
								(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)		Al		
0	Erstausgabe	00.00.00		Datum	Name		Schraubzwingplatte					
				Bearb.	00.00.00	Name						
				Gepr.								
				Norm								
				Hochschule 			01-02-05				Blatt	X
				Mittweida							Blätter	X
Rev.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.		Ersatz für:		Ersatz durch:			



Benötigte Stückzahl: 2

(Verwendungsbereich)			(Zul.Abw.)		(Oberfl.)	Maßstab 1:1	(Gewicht)
			Klasse			(Werkstoff Halbzeug)	
			DIN ISO 2768			(Rohteil-Nr.)	Al
0	Erstausgabe	00.00.00		Datum	Name	Winkel-unten	
			Bearb.	00.00.00	Name		
			Gepr.				
			Norm				
			Hochschule			01-02-06	
			Mittweida				
Rev.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.	Ersatz für:	Ersatz durch:

Blatt X  
Blätter X

## **Anhang E: Daten-CD**

## Literaturverzeichnis

- [Air13] AIRFOILTOOLS (2013): Flügelprofile, <https://www.airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx74modsm-il/>, <https://www.airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx63137-il/>, <https://www.airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il/> (abgerufen am 08. August 2013).
- [Alp05] ALPHACAM GmBH (2005): FDM Grunds Schulung - Schulungsunterlagen Software und RP-Maschine.
- [Alp13] ALPHACAM GmBH (2013): FDM, <http://www.alphacam.de/3dprinter/technologie> (abgerufen am 11. Juni 2013).
- [FSE13] FSE RULES COMMITTEE (Hrsg.) (2013): Formula Student Combustion Rules 2013, Version 1.1.0, Release Date: 10. Apr. 2013.
- [FSG13] FORMULA STUDENT GERMANY E.V. (Hrsg.) (2013): What is the Formula Student Germany competition?, <https://www.formulastudent.de/fsg/about/concept/>, (abgerufen am 18. Mai 2013).
- [FSGd13] FORMULA STUDENT GERMANY E.V. (Hrsg.) (2013): Disciplines, <https://www.formulastudent.de/fsg/about/disciplines/>, (abgerufen am 18. Mai 2013).
- [Geb12] GEBHARDT, Gerhard (2012): Vorlesungsskript. Strömungslehre.
- [Haf06] HAFNER, Edzard (2006): Strömungsmechanische Besonderheit kleiner Windkraftanlagen. DEWI Magazin Nr. 28. [https://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_28/09](https://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_28/09) (abgerufen am 11. August 2013).
- [Her08] HERWIG, Heinz (2008): Strömungsmechanik. Einführung in die Physik von technischen Strömungen ; mit 13 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- [Huc05] HUCHO, Wolf-Heinrich (2005): Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. 5 Aufl. 2005. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlag GmbH
- [Krä10] KRÄMER, Volker (2010): Praxishandbuch Simulationen in SolidWorks 2010. München: Karl Hanser Verlag.

- [Küm07] KÜMMEL, Wolfgang (2007): Technische Strömungsmechanik. Theorie und Praxis. 3. Aufl. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage.
- [OBR11] OERTEL jr., Herbert; BÖHLE, Martin; REVIOL, Thomas (2011): Strömungsmechanik. Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele : Vieweg + Teubner Verlag.
- [SAE13] SAE INTERNATIONAL (Hrsg.) (2013): Formula SAE® Rules.
- [SS07] SUREK, Dominik; STEMPIN, Silke (2007): Angewandte Strömungsmechanik. Für Praxis und Studium. 1. Aufl. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage.
- [Trz12] TRZESNIOWSKI, Michael (2012): Rennwagentechnik. Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. 3. Aufl. 2012. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- [UM13] UNIVERSITÄT MAGDEBURG (Hrsg.) (2013): Institut für Strömungstechnik & Thermodynamik, Lehrstuhl Strömungsmechanik & Strömungstechnik, Bild VII-8: Widerstandsbeiwert  $c_w$  von Kugel, Kreiszylinder und Kreisscheibe (quer angeströmt), <https://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/VII> (abgerufen am 07. Juni 2013)
- [Wei13] WEIDERMANN, Frank (2013): Mündliche Aussage zu der Genauigkeit des Messsystems im Windkanal, Mittweida, 12. September 2013.
- [Wre03] WRIGHT, P.: Ferrari Formula 1. Under the Skin of the Championship-winning F1-2000. 1. Aufl., Phoenix: David Bull Publishing (2003).

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 13. Septemeber 2013